

Joni Helander

# SELVITYS ASUINKERROSTALON E-LUKUUN VAIKUTTAVISTA TEKIJÖISTÄ

Opinnäytetyö  
Talotekniikka


Toukokuu 2013




**MIKKELIN AMMATTIKORKEAKOULU**

Mikkeli University of Applied Sciences

# KUVAILULEHTI

		Opinnäytetyön päivämäärä	
Tekijä(t)		Koulutusohjelma ja suuntautuminen	
Joni Helander		Talotekniikka	
Nimeke			
Selvitys asuinkerrostalon E-lukuun vaikuttavista tekijöistä			
Tiivistelmä			
<p>Tämän insinöörityön tarkoitus oli selvittää kaukolämpöön liitettävän asuinkerrostalon E-lukuun vaikuttavien tekijöiden suuruutta. Tutkittavia tekijöitä oli yhteensä yhdeksän kappaletta. Työssä otettiin huomioon myös tilojen ylälämpeneminen tutkimalla tilojen astetuntilukuja. Työn tavoitteena oli luoda aineisto, jonka perusteella selviää, millä tekijöillä on merkittävä vaikutus asuinkerrostalon E-lukuun ja mitä tekijöitä kannattaa ensimmäisenä parantaa E-lukua alennettaessa.</p> <p>Työn tekemiseksi valittiin mallikerrostalo, josta tehtiin IFC-malli MagiCAD ROOM -ohjelmistolla. Tämä malli tuotiin RIUSKA-simulointiohjelmaan, jonka avulla eri tekijöiden vaikutukset pystyttiin selvittämään. Tarvittavilta osin selvitys tehtiin Excel-taulukkolaskennalla. Kutakin yksittäistä tekijää tutkittaessa perusmallin lähtötietoja muutettiin vähän kerrallaan, tehtiin simuloinnit, kirjattiin tulokset ja verrattiin saatuja tuloksia perusmallin energiatuloksiin.</p> <p>Tutkittavista tekijöistä merkittävimmät vaikutukset kaukolämpöön liitettävän asuinkerrostalon E-lukuun olivat aurinkopaneelien ja -keräimien käytöllä, rakennuksen vaipan johtumislämpöhäviöiden pienentämisellä ja ilmanvaihdon lämmöntalteenoton tehostamisella. Näistä tekijöistä lämmöntalteenoton tehostaminen ja aurinkoenergian käyttö ei pahenna rakennuksen ylälämpenemistä. Hyvä tapa alentaa E-lukua tilojen ylälämpeneminen huomioiden on myös valaistuksen ominaissähkötehon alentaminen.</p> <p>Koska rakennuksien E-lukuun vaikuttavia tekijöitä on lukuisia voisi aiheesta tehdä paljon lisätutkimuksia. Tulevaisuudessa tullaan kiinnittämään kasvavassa määrin huomiota rakennusten energiatehokkuuteen ja E-lukuun, jolloin eri tekijöiden vaikutukset tulisi tiedostaa. Suositeltavaa on tehostaa sellaisia E-lukuun vaikuttavia tekijöitä, jotka eivät aiheuta merkittäviä lisäkustannuksia, mutta vaikuttavat E-lukuun konkreettisesti. Myös tilojen ylälämpeneminen tulee huomioida eri tekijöitä parannettaessa.</p>			
Asiasanat (avainsanat)			
Energiatehokkuus, energian säästö, LVI-suunnittelu, matalaenergiatalot, uudisrakentaminen.			
Sivumäärä	Kieli	URN	
80 + 23	Suomi		
Huomautus (huomautukset liitteistä)			
Ohjaavan opettajan nimi		Opinnäytetyön toimeksiantaja	
Mika Kuusela		Etteplan Design Center Oy	

## DESCRIPTION

 <p><b>MIKKELIN AMMATTIKORKEAKOULU</b> Mikkeli University of Applied Sciences</p>		<b>Date of the bachelor's thesis</b>	
<b>Author(s)</b>  Joni Helander		<b>Degree programme and option</b>  Building Services Engineering	
<b>Name of the bachelor's thesis</b>  Research of factors which affect Finnish E-count in district heated block of flats			
<b>Abstract</b>  <p>This bachelor thesis handles nine factors which affect Finnish E-count in district heated block of flats. The reader of this document gets to know which of these factors have the most extensive effect on Finnish E-count and which factors have major priority to be changed first. This research has also paid attention to the factors which cause overheating problems.</p> <p>In the beginning of this thesis, an IFC-model of a model building has been created by means of the MagiCAD ROOM -software. This IFC-model has been brought to RIUSKA-simulation program for simulation of the nine factors. During the simulation, each factor has been changed a little bit at once and results have been registered for each simulation. The results have been handled in a spreadsheet.</p> <p>The most extensive effects of the factors affecting the Finnish E-count which have been found out from the simulation results are solar panels and collectors, U-values of the building structures and heat recovery system of ventilation. Surface of the windows and balcony glazing have the least effect on the E-count. In case of overheating problem, it is justified to intensify use of solar energy and energy efficient heat recovery system. Because of low convection, heat losses can cause overheating problems.</p> <p>Because there are several factors influencing the Finnish E-count, there are still many factors which have not been researched. In the future it will be paid more and more attention to energy efficiency of the buildings. That's why effects of the factors should be known.</p>			
<b>Subject headings, (keywords)</b>  Energy efficiency, energy saving, HVAC-design, low energy buildings, new construction.			
<b>Pages</b>  80 + 23	<b>Language</b>  Finnish	<b>URN</b>	
<b>Remarks, notes on appendices</b>			
<b>Tutor</b>  Mika Kuusela		<b>Bachelor's thesis assigned by</b>  Etteplan Design Center Oy	

# SISÄLTÖ

1	JOHDANTO .....	1
2	TYÖN TAUSTAA .....	2
2.1	Rakennusten energiankulutus Suomessa .....	2
2.2	Vuoden 2012 energiamääräykset.....	5
2.2.1	E-luvun määritelmä ja rakennuksen ostoenergian kulutus .....	7
2.2.2	Määräysten koskemat rakennukset .....	7
2.2.3	Laskennan lähtötiedot ja vaatimukset .....	8
2.2.4	Kesäajan huonelämpötilan hallinta .....	9
3	AINEISTO JA MENETELMÄT .....	11
4	SIMULOINTIEN TULOKSET .....	17
4.1	Vaipan johtumislämpöhäviöt.....	18
4.2	Ikkunoiden pinta-alat .....	24
4.3	Parvekelasitukset .....	28
4.4	Rakennuksen vaipan ilmatiiviys .....	30
4.5	Ilmanvaihdon puhaltimien ominaissähköteho .....	33
4.6	Ilmanvaihdon lämmöntalteenotto .....	35
4.7	Ilmanjakotapa .....	38
4.8	Aurinkoenergian hyödyntäminen .....	40
4.9	Valaisimet .....	46
4.10	Eri tekijöiden yhteisvaikutukset .....	53
5	TULOSTEN TARKASTELU .....	55
5.1	Rakennuksen vaipan lämmönläpäisy.....	56
5.2	Parvekelasitusten säteilyn läpäisy ja ikkunoiden pinta-alat.....	60
5.3	Ilmanvaihtojärjestelmä .....	63
5.4	Valaistus ja aurinkoenergian käyttö.....	66
6	MUUT AIHETTA KOSKEVAT TUTKIMUKSET.....	70
7	YHTEENVETO .....	75
	LIITTEET	
	1 Simuloinneissa käytetyt rakenteet	
	2 Lämmitysjärjestelmän sähköenergian laskenta	
	3 Simulointien tulokset: Rakenteiden U-arvot. Betonikerrostalo	
	4 Simulointien tulokset: Rakenteiden U-arvot. Puukerrostalo	

- 5 Simulointien tulokset: Ikkunoiden pinta-ala
- 6 Simulointien tulokset: Parvekelasitukset
- 7 Simulointien tulokset: Vaipan ilmatiiviys
- 8 Simulointien tulokset: Puhaltimien ominaissähköteho
- 9 Simulointien tulokset: Ilmanvaihdon lämmöntalteenotto
- 10 Simulointien tulokset: Ilmanjakotapa
- 11 Simulointien tulokset: Aurinkoenergian hyödyntäminen
- 12 Valaistuksen ominaissähkötehon ja käyttöajan laskenta
- 13 Simulointien tulokset: Valaisimet ja valaistuksen ominaissähköteho
- 14 Simulointien tulokset: Eri tekijöiden yhteisvaikutukset

## MERKINNÄT

$A_{\text{huone}}$	huoneen pinta-ala, $\text{m}^2$
$A_i$	rakenneosan i pinta-ala, $\text{m}^2$
$A_{\text{ikk}}$	koko rakennuksen ikkunoiden pinta-ala, $\text{m}^2$
$A_{\text{ikk},i}$	julkisivun i ikkunoiden pinta-ala, $\text{m}^2$
$A_{\text{netto}}$	rakennuksen lämmitetty nettoala, $\text{m}^2$
$A_{\text{netto},i}$	rakennusosan i lämmitetty nettoala, jonka lämmitysjärjestelmä kattaa, $\text{m}^2$
$\beta$	valaistuksen alenemakerroin, -
$\Delta T_{\text{lkv,pumppu}}$	lämpimän käyttöveden kiertojohdon pumpun käyttöaika, $\text{h/vrk}$
$\Delta T_{\text{keräin,pumppu i}}$	aurinkokeräinjärjestelmän kiertovesipumpun i vuotuinen käyntiaika, h
$\Delta T_{\text{tu}}$	ajanjakson pituus jolloin ulkolämpötila on vakio Suomen rakennusmääräyskokoelmassa määritetyn säädäntä mukaisesti laskettuna, h
$\Delta T_{\text{valaistus}}$	valaistuksen käyttöaika, h
$\Delta t_{\text{ilma,puhallin}}$	ilman lämpeneminen puhaltimessa, $^{\circ}\text{C}$
$\Delta p_{\text{puh}}$	yhden puhaltimen paineenkorotus, Pa
$E$	rakennuksen energialuku "E-luku", $\text{kWh}/(\text{m}^2\text{a})$
$E_i$	tilakohtainen valaistustaso, lx
$e_{\text{tilat}}$	lämmönjakelujärjestelmän apulaitteiden sähköenergiankulutus, $\text{kWh}/(\text{m}^2\text{a})$
$e_{\text{tuotto}}$	lämmöntuottojärjestelmän apulaitteiden sähköenergiankulutus, $\text{kWh}/(\text{m}^2\text{a})$
$f_{\text{val,ohj}}$	valaistuksen ohjaustavasta riippuva kerroin, -
$f_{\text{kaukojäähdytys}}$	kaukojäähdytyksen energiamuodon kerroin, 0,4
$f_{\text{kaukolämpö}}$	kaukolämmön energiamuodon kerroin, 0,7
$f_{\text{polttoaine},i}$	polttoaineen i energiamuodon kerroin, fossiili- set polttoaineet 1,0 uusiutuvat polttoaineet 0,5
$f_{\text{sähkö}}$	sähkön energiamuodon kerroin, 1,7
$G_{\text{säteily,pystypinta}}$	pystypinnalle tuleva auringon kokonaissäteilyenergia säteilylle kohdistuvaa pinta-alaa kohti laskettuna, $\text{kWh}/\text{m}^2$

$g_g$	ikkunan lasiosan auringon kokonaissäteilyn läpäisyosuus (sisältää konvektion lasista), %
$g_w$	koko ikkunan auringon kokonaissäteilyn läpäisyosuus (sisältää konvektion lasista), %
$L_{lkv,omin}$	lämpimän käyttöveden kiertojohdon ominaispituus, m/m <sup>2</sup>
$n_{ivkone}$	ilmanvaihtokoneiden lukumäärä, kpl
$n_{lämmityslaite}$	lämpimän käyttöveden kiertojohtoon kytkettyjen lämmityslaitteiden lukumäärä, kpl
$\eta_{a,iv}$	rakennuksen ilmanvaihdon lämmöntalteenoton poistoilman vuosihyötysuhde, -
$\eta_{a,ivkone}$	ilmanvaihtokoneen lämmöntalteenoton poistoilman vuosihyötysuhde, -
$\eta_{keräimet,lkv}$	keräimistä vuodessa saatavan energian suhde käyttöveden lämmityksen vuotuisen energiantarpeeseen, -
$\eta_{Km}$	lampun valotehokkuus, lm/W
$\eta_{lkv,siirto}$	lämpimän käyttöveden siirron hyötysuhde, -
$\eta_{paneelit}$	paneeleista saatavan vuotuisen sähköenergian suhde koko rakennuksen sähköenergiatarpeeseen, -
$\eta_{paneelit,i}$	paneeleista saatavan vuotuisen sähköenergian suhde käyttöryhmän i vuotuisen sähköenergiatarpeeseen, -
$\eta_{puh,kok}$	puhaltimen kokonaishyötysuhde, -
$\eta_t$	ilmanvaihtokoneen tuloilman lämpötilasuhde, -
$\eta_{t,EN308:1997}$	Standardin EN 308:1997 mukaisesti laskettu ilmanvaihtokoneen tuloilman lämpötilasuhde, -
$\eta_{t,mit}$	ilmanvaihtokoneen mitoitusulkolämpötilalla laskettu tuloilman lämpötilasuhde, -
$\eta_{tilat}$	lämmitysjärjestelmän lämmönjaon ja luovutuksen hyötysuhde, -
$\eta_{tuotto}$	lämmitysenergian tuoton hyötysuhde tilojen, ilmanvaihdon ja lämpimän käyttöveden lämmityksessä, -
$\eta_{valaistus}$	valaistushyötysuhde, -
$Q_{kaukojäähdytys}$	kaukojäähdytyksen energiankulutus, kWh/a
$Q_{kaukolämpö}$	kaukolämmityksen energiankulutus, kWh/a
$Q_{keräimet,lkv,omin}$	aurinkokeräimillä tuotettu käyttöveden ominaislämmitysenergia, kWh/m <sup>2</sup> a

$Q_{\text{lämmitys,iv,omin,brutto}}$	ilmanvaihdon lämmityksen ominaisenergian bruttotarve, kWh/m <sup>2</sup> a
$Q_{\text{lämmitys,lkv,omin,osto}}$	rakennukseen ostettava käyttöveden lämmityksen ominaisenergia, kWh/m <sup>2</sup> a
$Q_{\text{lämmitys,tilat,omin,brutto}}$	tilojen lämmityksen ominaisenergian bruttotarve, kWh/m <sup>2</sup> a
$Q_{\text{polttoaine,i}}$	polttoaineen i sisältämän energian kulutus, kWh/a
$Q_{\text{rakenneosa,i}}$	rakenneosan i lävitse johtunut lämpöenergia, kWh/a
$q_{50}$	rakennuksen vaipan ilmanvuotoluku, m <sup>3</sup> /(h,m <sup>2</sup> )
$q_{v,lkv,mit}$	lämpimän käyttöveden kiertojohtoon mitoitusvirtaama, dm <sup>3</sup> /s (tässä työssä 1,0 dm <sup>3</sup> /s)
$q_{v,omin}$	ilmanvaihdon ominaisilmavirta, dm <sup>3</sup> /(s,m <sup>2</sup> )
$q_{v,puh}$	ilmanvaihtokoneen poisto- tai tuloilmapuhaltimen tilavuusvirta, m <sup>3</sup> /s
$R_i$	rakenneosan i lämmönvastus, (m <sup>2</sup> K)/W
$R_{LTO}$	ilmanvaihtokoneen tuloilma- ja poistoilmavirran välinen suhde, -
$SFP$	puhaltimen ominaissähköteho, kW/(m <sup>3</sup> /s)
$ST$	lasin tai lasituksen auringon säteilyenergian läpäisy, -
$t_{j, \min}$	jäteilman alin sallittu lämpötila, °C
$t_s$	sisäilman lämpötila, °C
$t_{t,LTO}$	tuloilman lämpötila lämmöntalteenottolaitteen jälkeen, °C
$t_t$	tuloilman lämpötila, °C
$t_u$	ulkoilman lämpötila, °C
$t_{u,mit}$	ulkoilman lämpötila mitoitustilanteessa, °C
$U_i$	rakennusosan i lämmönläpäisykerroin, W/m <sup>2</sup> K
$W_{\text{aurinko,pumput}}$	aurinkolämpöjärjestelmän pumppujen sähköenergian kulutus, kWh/a
$W_{i,omin,osto}$	rakennukseen ostettava energiankäyttöryhmän i vuotuinen ominaissähköenergia, kWh/m <sup>2</sup> a
$W_{\text{lkv,pumppu}}$	lämminvestiokierroksen käyttöpumpun sähköenergian kulutus, kWh/a
$W_{LP,lämmitys}$	lämpöpumppujärjestelmän sähköenergiankulutus, kWh/a
$W_{\text{lämmitys}}$	lämmitysjärjestelmän sähköenergian kulutus, kWh/a



$W_{\text{paneelit,i,omin}}$	aurinkopaneeleilla energiankäyttörhymälle i tuotettu vuotuinen ominaissähköenergia lämmitettyä nettopinta-alaa kohti, kWh/m <sup>2</sup> a
$W_{\text{paneelit,omin}}$	aurinkopaneeleilla koko rakennukseen tuotettu vuotuinen ominaissähköenergia lämmitettyä nettopinta-alaa kohti, kWh/m <sup>2</sup> a
$W_{\text{puhaltimet}}$	puhaltimien ominaissähköenergiankulutus, kWh/m <sup>2</sup> a
$W_{\text{sähkö}}$	rakennukseen ostettava vuotuinen sähköenergia, kWh/a
$W_{\text{sähkö,omin}}$	rakennukseen ostettava vuotuinen ominaissähköenergia kWh/m <sup>2</sup> a
$W_{\text{tilat}}$	lämmönjakelujärjestelmän apulaitteiden sähköenergian kulutus, kWh/a
$W_{\text{tuotto,apu}}$	lämmöntuottojärjestelmän apulaitteiden sähköenergian kulutus, kWh/a
$W_{\text{valaistus}}$	valaistuksen vuotuinen sähköenergian kulutus, kWh/a
$W_{\text{valaistus,omin}}$	valaistuksen vuotuinen ominaissähköenergian kulutus, kWh/m <sup>2</sup> ,a
$\phi_{\text{lkv,kiertohäviö,omin}}$	lämpimän käyttöveden kiertojohdon lämpöhäviön ominaisteho, W/m
$\phi_{\text{lkv,pumppu}}$	lämminvestikiertojohdon käyttöpumpun ottoteho, W
$\phi_{\text{keräin,pumppu i}}$	aurinkokeräinjärjestelmän kiertovesipumpun ottoteho, W
$\phi_{\text{puh}}$	puhaltimen ottoteho, W
$\phi_{\text{val,omin}}$	valaistuksen huoneen pinta-alaa kohti laskettu ominaissähköteho, W/m <sup>2</sup>
$\phi_{\text{val,omin}} \cdot f$	valaistuksen ohjauskertoimella $f_{\text{val,ohj}}$ painotettu huoneen pinta-alaa kohti laskettu valaistuksen ominaissähköteho, W/m <sup>2</sup>
$\phi_{\text{val,omin}} \cdot f_i$	valaisimen i käyttämä, valaistuksen ohjauskertoimella $f_{\text{val,ohj}}$ painotettu huoneen pinta-alaa kohti laskettu valaistuksen ominaissähköteho, W/m <sup>2</sup>
$\phi_{\text{val,omin,kesk}}$	rakennuksen tilojen pinta-aloilla painotettu keskimääräisen valaisimien ominaissähköteho, W/m <sup>2</sup>
$\lambda_i$	rakennemateriaalin i lämmönjohtavuus, W/(mK)

## 1 JOHDANTO

Tässä opinnäytetyössä käsitellään kaukolämpöön liitettävän asuinkerrostalon energiatehokkuutta, ylikämmenemistä, E-lukua ja niihin vaikuttavia seikkoja. Työ pohjautuu vankasti 1.7.2012 voimaan tulleen lakiin rakennusten energiatehokkuudesta, jonka mukaan lähes kaikille uusille rakennuksille tulee laskea E-luku jo rakennuslupaa haettaessa [1, s.8-10]. Laki koskien E-luvun laskentaa on esitetty Suomen rakennusmääräyskokoelman osassa D3 [1].

Opinnäytetyön tavoitteena on luoda työn tilaavalle yritykselle aineisto, josta käy ilmi tutkittavien tekijöiden muutosten vaikutus kaukolämpöön liitettävän asuinkerrostalon E-lukuun. Aineiston perusteella lukija saa kuvan siitä, kuinka suuret vaikutukset milläkin tekijällä on rakennuksen E-lukuun ja mitä tekijää kannattaa lähteä muuttamaan E-lukua parannettaessa. Työssä esitetään myös eri kirjallisuuslähteiden tietoa tutkittavista rakennusten E-lukuun vaikuttavista tekijöistä ja rakennuksen energiatehokkuudesta.

Työssä tutkittavien tekijöiden vaikutusta E-lukuun tutkitaan mallikerrostalon avulla. Eri tekijöiden vaikutuksien selvittämiseksi valitaan kerrostalorakennus, josta tehdään IFC-malli. Tämä malli tuodaan RIUSKA-simulointiohjelmaan, jonka avulla eri tekijöiden vaikutukset pystytään simuloimaan. Tarvittavilta osin tutkimus tehdään taulukkolaskennalla.

Koska E-lukuun vaikuttavia tekijöitä on lukuisia, keskitytään tässä opinnäytetyössä muutamiin valittuihin tekijöihin. Tästä syystä työ rajoittuu vain kaukolämpöön liitetyn asuinkerrostalon rakenne- ja taloteknisiin ratkaisuihin, joista tutkitaan seuraavia E-lukuun vaikuttavia tekijöitä:

- rakennuksen rakenteiden, ovien ja ikkunoiden lämmönläpäisy
- rakennuksen vaipan ilmanpitävyys
- ikkunoiden pinta-alat
- parvekelasitukset
- ilmanvaihdon lämmöntalteenoton hyötysuhde
- ilmanvaihdon puhaltimien ominaissähköteho
- ilmanvaihdon järjestelmätyyppi

- valaistus
- aurinkoenergian hyödyntäminen.

Näiden yksittäisten tekijöiden ohella tutkitaan edellä mainittujen tekijöiden yhteisvaikutuksia ja otetaan huomioon tekijät, jotka vaikuttavat rakennuksen yllämpenemiseen. Työn tarkoituksena ei ole selventää E-lukulaskennan kulkua seikkaperäisesti, vaan tutkia edellä mainittujen tekijöiden vaikutuksia rakennuksen E-lukuun. Työssä ei myöskään oteta huomioon eri tekijöiden rakennus- tai huoltokustannuksia.

Tilojen yllämpenemistä tutkittaessa ei vertailla erilaisia vaihtoehtoja yllämpenemisen estämiseksi, vaan selvitetään, mitkä tutkittavista tekijöistä vaikuttavat tilojen astetuntilukuihin, jolloin yllämpeneminen tulee ottaa huomioon rakennusta suunniteltaessa.

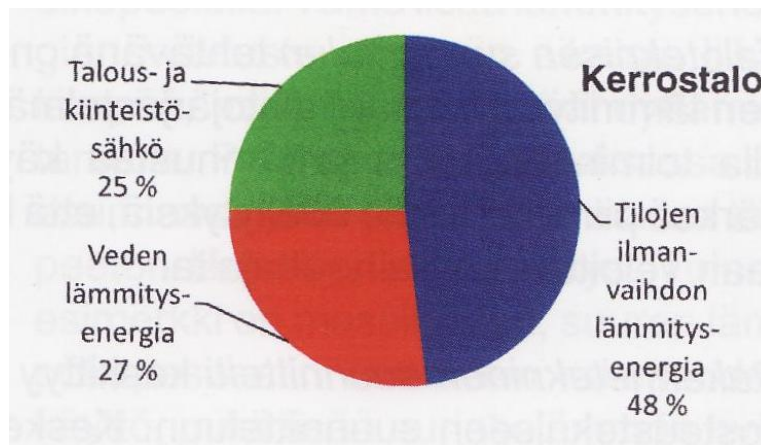
Opinnäytetyön lopussa otetaan kantaa myös muiden rakennusluokkien E-luvun parannusmahdollisuuksiin. Kuitenkaan erillisiä simulointeja ei tehdä eri rakennusluokille, vaan E-luvun riippuvuutta pohditaan perustuen eri rakennusluokkien tyypillisiin geometrioihin ja standardikäyttöihin. Eri rakennusluokkien tarkkaan tutkimiseen tarvittaisiin lisätutkimuksia, joihin ei tässä insinöörityössä ryhdytä.

## **2 TYÖN TAUSTAA**

Tässä luvussa käsitellään työn taustoja. Luvussa selvitetään muun muassa, mistä uudet energiamääräykset ovat saaneet alkunsa, rakennusten energiatehokkuuden parantamista ja yleisesti energian käyttöä Suomessa.

### **2.1 Rakennusten energiankulutus Suomessa**

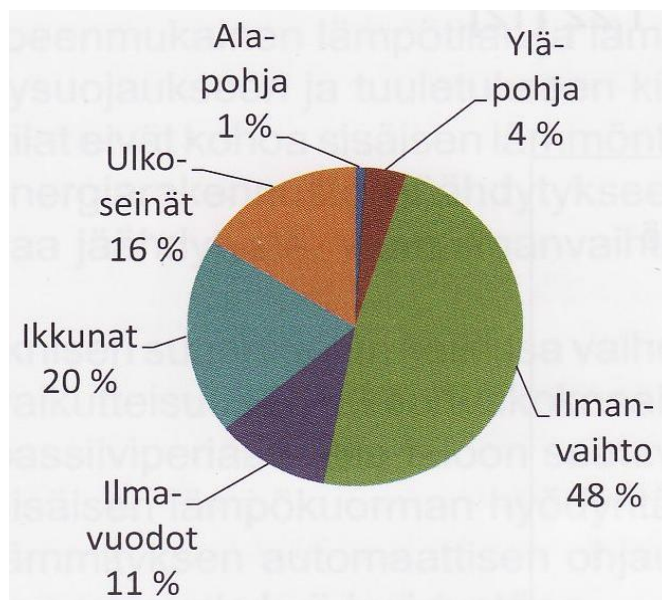
Luonnonvarojen rajallisuuden ja ilmastonmuutoksen myötä maapallon energiatalouden on alettu kiinnittää yhä enemmän huomiota ja asettaa yhä tiukempia vaatimuksia. Suomen valtakunnallista energian käyttöä ja sen jakautumista on tutkinut muun muassa Valtion teknillinen tutkimuskeskus (VTT). Kuvassa 1 on esitetty energian käytön jakautuminen normikerrostalossa vuonna 2005 [3]. Kuvassa 1 esitettyyn tilojen ilmanvaihdon lämmitysenergian osuuteen (48 %) on laskettu tilojen ja ilmanvaihdon lämmitys yhteensä [4]. Normitalolla tarkoitetaan rakennusta, joka täyttää rakennus- ja energialainsäädännössä voimassa olevat rakennusmääräysten vähimmäisvaatimukset [5].



**KUVA 1. Energian käytön jakautuminen kerrostalossa (vuoden 2005 normitalossa) [3]**

Rakennusten teknisessä suunnittelussa pyritään tehostamaan erityisesti niitä tekijöitä, joiden vaikutus rakennuksen energian käyttöön on suuri. Kuvasta 1 korostuu suuri veden lämmitysenergian määrä. [3.]

Rakennuksen E-lukua laskettaessa rakennuksen energian käyttö tulee jakaa pieniin kokonaisuuksiin, joita voivat olla muun muassa tilojen lämmitysenergia, valaistusenergia ja teknisten laitteiden kuluttama energia. Nämä osakokonaisuudet voidaan jakaa edelleen eri alatekijöihin. Oikealla osittamisella päästään vertailemaan rakennuksen eri energiankäytön tekijöitä ja niiden säästöpotentiaaleja, sekä miettimään mitä osatekijöitä kannattaa kehittää energiatehokkuuden parantamiseksi. Vertailun pohjana voidaan käyttää esimerkiksi tämän insinöörityön tuloksia. Kuvassa 2 on esitetty kerrostalon (vuoden 2005 normitalon) tilojen lämmitysenergian jakautuminen eri tekijöiden kesken [3].



**KUVA 2. Tilojen lämmitysenergian jakautuminen kerrostalossa (vuoden 2005 normitalossa) [3]**

Kuvista 1 ja 2 nähdään rakennuksen energiankäytön jakautuminen, jonka perusteella voidaan havaita suurimmat energiankäytön osatekijät. Tilojen lämmityksen suurin energiankuluttaja vuoden 2005 normikerrostalossa oli ilmanvaihto 48 % osuudella, joten lämmöntalteenotolla on suuri energiansäästöpotentialiaali. Seuraavaksi suurimpana tekijänä tulivat rakennuksen vaipan ikkunat ja ulkoseinät, myös ilmavuodoilla on merkittävä vaikutus tilojen lämmitysenergian kulutukseen. Kerrostalon vaipan osalta pienimmät lämmitysenergiankuluttajat olivat ala- ja yläpohja. [3.]

Rakennuksen rakenteiden energiatehokkuutta voidaan parantaa rakenteiden lämmönläpäisykerrointa pienentämällä, joka yleensä tarkoittaa rakenteiden lisälämmöneristystä. Rakenteiden ilmanpitävyyttä voidaan parantaa ilmatiiveillä rakenteilla.

Ylä- ja alapohjan pieni energiankulutus vuoden 2005 normitalossa selittyy muista rakenneosista pienemmillä lämmönläpäisykertoimilla. Myös rakennusgeometrialla on osansa tulokseen, koska ylä- ja alapohjan pinta-alat ovat pienet suhteessa ulkoseinien ja ikkunoiden pinta-alaan kerrostalorakennuksessa. Pientalossa ylä- ja alapohjan vaikutus sen sijaan on suurempi.

Kuvien 1 ja 2 mukainen kerrostalorakennuksen energian käytön jakautuminen ei ole enää kovin hyvä vertailukohde nykyään rakennettaviin uusiin kerrostaloihin. Vuonna 2005 voimassa olleita energiamääräyksiä on muutettu vuonna 2007 ja edelleen vuon-

na 2012. Nykyään muun muassa rakennusten ilmanvaihdon lämmöntalteenotolle, rakenteiden U-arvoille ja ilmanpitävyydelle on asetettu huomattavasti tiukemmat vaatimukset rakennusten energiatehokkuuden parantamiseksi.

Uudet vuonna 2012 voimaan tulleet energiamääräykset rakennusten energiatehokkuudesta ovat osa Euroopan unionin (EU) tavoitetta energiatehokkuuden parantamiseksi, kasvihuonekaasujen vähentämiseksi ja uusiutuvien energiamuotojen käytön lisäämiseksi. EU on sitoutunut alentamaan kasvihuonekaasupäästöjään 20 prosentilla, nostamaan uusiutuvien energialähteiden osuuden 20 prosenttiin energian loppukulutuksesta ja parantamaan energiatehokkuutta 20 prosentilla vuoteen 2020 mennessä. Suomelle on asetettu tavoite uusiutuvien energialähteiden osuuden nostamiseksi 38 prosenttiin vuoteen 2020 mennessä. [6.]

Suomessa energiatehokkuutta tehostettiin vuonna 2010 jo 30 % silloisten energiatehokkuusmääräysten myötä [7]. Vuonna 2012 tulleiden uusien energiamääräysten myötä energiatehokkuutta parannetaan edelleen 20 % [7]. Valtioneuvoston ilmasto- ja energiastrategiassa vuonna 2008 Suomen energian loppukulutukselle asetettiin vuoden 2020 tavoitteeksi 310 TWh, joka on likimain sama kuin vuonna 2011 [6].

Vuonna 2012 voimaan tulleista energiatehokkuutta koskevista määräyksissä jätettiin pois vaatimus uusiutuvan energian käytöstä rakennuksissa. Tämä määräys on kuitenkin odotettavissa, kun energiatehokkuutta tehostetaan uusilla määräyksillä tulevaisuudessa. [6; 8.]

Rakennusten osuus Suomen kokonaisenergiankulutuksesta oli vuonna 2011 noin 40 % [6]. Vuonna 2020 uusien rakennusten tulee olla lähes nollaenergiarakennuksia [7]. Täten voidaan olettaa, että rakennusten energiatehokkuudelle tullaan asettamaan edelleen tiukempia määräyksiä tulevinä vuosina, jolloin rakennusten energiatehokkuuteen vaikuttavien tekijöiden tunteminen ja niiden vaikutusten tietäminen nousevat avaintekijöiksi rakennusten energiatehokkuutta parannettaessa.

## **2.2 Vuoden 2012 energiamääräykset**

Uudet lakimääräykset ovat tulleet voimaan 1.7.2012 uudistuneen Suomen rakennusmääräyskokoelman osan D3 [1] myötä. Uudessa Suomen rakennusmääräyskokoelman

osassa D3 on annettu määräykset ja ohjeet rakennuksen E-luvun sekä astetuntiluvun laskemiseksi. Merkitsevä uudistus on ollut siirtyminen rakennuksen kokonaisenergiatarkasteluun sekä energiamuotokertoimien käyttöönotto, joiden avulla eri energiamuodot saadaan yhteismitallistettua ja rakennuksia vertailtua keskenään.

Jokaiselle energiamuodolle (kaukolämpö, uusiutuva energia, sähköenergia ja niin edelleen) on annettu oma energiamuotokertoimensa, joka vaikuttaa rakennuksen E-lukuun olennaisesti. Sähkön suuri energiamuotokerroin 1,7 selittyy muun muassa sähköenergian tuotannon ja käytön aiheuttamista haittavaikutuksista ilmastolle. Sen sijaan uusiutuvien energialähteiden energiamuotokerroin on vain 0,5 koska sen ympäristöä kuormittavat vaikutukset ovat pienemmät.

Suomen rakennusmääräyskokoelman osa D5 [9] on myös uudistumassa. Kyseisessä uudessa osassa esitetään rakennuksen E-luvun laskenta kuukausitasolla. Uudistuva Suomen rakennusmääräyskokoelman osa D5 [9] sisältää oleellista tietoa myös E-luvun laskemiseksi simulointiohjelmilla, jollaista myös tässä opinnäytetyössä tullaan käyttämään. Opinnäytetyötä tehtäessä uudesta Suomen rakennusmääräyskokoelman osasta D5 on käytettävissä 14.3.2012 julkaistu luonnos [9] myöhemmin julkaistavasta D5:stä. Tätä opinnäytetyötä tehtäessä käytetään edellä mainittua luonnosta.

Uudet energiamääräykset ja E-luvun laskenta edellyttävät yhä tiiviimpää yhteistyötä eri alojen suunnittelijoiden kesken rakennuksen suunnittelu- ja rakennusvaiheessa. Koska E-luku kuvastaa rakennuksen kokonaisenergiankulutusta lämmitettävää nettopinta-alaa kohti, energiamuotokertoimilla painotettuna, korostuu LVI-, sähkö- ja rakennesuunnittelijan sekä arkkitehdin yhteistyö koko rakennuksen määräystenmukaisuuden saavuttamiseksi. Esimerkiksi jos rakenteiden lämmönläpäisykertoimissa tingitään, joudutaan hukattu energiamäärä kompensoimaan esimerkiksi tehokkaammalla ilmanvaihdon lämmöntalteenotolla.

Luvuissa 2.2.1 - 2.2.4 on kerrottu E-luvun laskennan määräyksistä ja ohjeista. Luvuissa on poimintoja Suomen rakennusmääräyskokoelman osista D3 [1] ja D5 [9]. Nämä kohdat koskevat oleellisesti E-luvun laskentaa ja siten myös tätä opinnäytetyötä. Lainauksissa olevat kolmannen tason kohdat ovat velvoittavia määräyksiä. Neljännen tason kohdat ovat ohjeita, joista voidaan poiketa, jos käytetään muita ratkaisuja, jotka täyttävät rakentamiselle asetetut vaatimukset.

## 2.2.1 E-luvun määritelmä ja rakennuksen ostoenergian kulutus

Rakennuksen E-luku on määritelty Suomen rakennusmääräyskokoelman osassa D3 seuraavasti:

"2.1.2 Rakennuksen kokonaisenergiankulutus (E-luku) on laskettava. E-luku on energiamuotojen kertoimilla painotettu rakennuksen vuotuinen ostoenergiankulutus rakennustyypin standardikäytöllä lämmitettyä nettoalaa kohden. E-luku saadaan laskemalla yhteen ostoenergian ja energiamuotojen kertoimien tulot energiamuodoittain." [1.]

Toisin sanoen E-luku saadaan laskettua Suomen rakennusmääräyskokoelman osan D5 [9] mukaisesti kaavasta (1).

$$E = \frac{f_{kaukolämpö}Q_{kaukolämpö} + f_{kaukojäähdytys}Q_{kaukojäähdytys} + \sum f_{polttoaine,i}Q_{polttoaine,i} + f_{sähkö}W_{sähkö}}{A_{netto}} \quad (1)$$

Uusien energiamääräysten mukaan asuinkerrostalon, jota tässä insinöörityössä tutkitaan, E-luku saa olla korkeintaan 130 kWh/(m<sup>2</sup>a) [1].

## 2.2.2 Määräysten koskemmat rakennukset

Suomen rakennusmääräyskokoelman osassa D3 on määrätty seuraavasti:

"1.1.1 Nämä määräykset ja ohjeet koskevat uusia rakennuksia, joissa käytetään energiaa tilojen ja ilmanvaihdon lämmitykseen ja sen lisäksi mahdollisesti jäähdytykseen tarkoituksenmukaisten sisäilmasto-olosuhteiden ylläpitämiseksi." [1.]

E-luku tulee pääsääntöisesti laskea kaikille uudisrakennuksille. E-lukua ei kuitenkaan tarvitse laskea Suomen rakennusmääräyskokoelman osan D3 kohdan 1.1.3 mukaisesti seuraaville rakennuksille:

"1.1.3 Nämä määräykset eivät kuitenkaan koske seuraavia rakennuksia:

a) tuotantorakennus, jossa tuotantoprosessi luovuttaa niin suuren määrän lämpöenergiaa, että halutun huonelämpötilan aikaansaamiseen ei tarvita ollenkaan tai tarvitaan vain vähäisessä määrin muuta lämmitysenergiaa tai tuotantotila, jossa lämmityskau-



den ulkopuolella runsas lämmöneristys nostaisi haitallisesti huonelämpötilaa tai lisäisi oleellisesti jäähdytysenergian kulutusta,

b) rakennus, jonka lämmitetty netto-ala on enintään 50 m<sup>2</sup>,

c) muut kuin asuinkäyttöön tarkoitetut maatalousrakennukset, joissa energiankäyttö on vähäinen,

d) kasvihuone, väestönsuoja tai muu rakennus, jonka käyttö tarkoitukseensa vaikeutuisi kohtuuttomasti näitä määräyksiä noudatettaessa.

e) loma-asunto, johon ei ole suunniteltu kokovuotiseen käyttöön tarkoitettua lämmitysjärjestelmää.

f) määräajan paikallaan pysytettävä siirtokelpoinen rakennus (määräaikainen rakennus), joka on valmistettu ennen näiden määräyksiä voimaantuloa ja jonka käyttötarkoitus ei oleellisesti muutu. Tällaisia rakennuksia voivat olla esimerkiksi väliaikaiseen käyttöön tarkoitetut koulu- ja päiväkotirakennukset." [1.]

E-lukua ei myöskään tarvitse laskea loma-asunnoille tai määräaikaisille rakennuksille Suomen rakennusmääräyskokoelman osan D3 kohtien 1.1.4 ja 1.1.5 mukaisesti. Tarkemmat määräykset rakennuksista, joille laskenta tehdään, on esitetty Suomen rakennusmääräyskokoelman osassa D3. [1.]

### **2.2.3 Laskennan lähtötiedot ja vaatimukset**

Suomen rakennusmääräyskokoelman osassa D3 on määrätty E-luvun laskennasta seuraavasti:

"2.1.1 Rakennuksen ostoenergiankulutus on laskettava näissä määräyksissä esitetyillä ulkoilman säätiedoilla, sisäilmasto-olosuhteiden, rakennuksen ja sen järjestelmien käyttö- ja käyntiaikojen sekä sisäisten lämpökuormien lähtöarvoilla (rakennustyyppin standardikäyttö). Muut energialaskennan tarvitsemat lähtötiedot otetaan rakennuksen suunnitteluasiakirjoista." [1.]

Vaatimukset rakennuksen energiatehokkuudelle on esitetty Suomen rakennusmääräyskokoelman osan D3 kohdassa 2. Tämä kohta sisältää rakennusluokkakokohtaisen E-luvun enimmäisarvon lisäksi määräykset erilaisille yksittäistekijöille ja niiden vaihteluväleille. Tällaisia tekijöitä ovat muun muossa rakennuksen lämmönläpäisykertoimet,

ilmanvaihdon lämmöntalteenoton hyötysuhde, puhaltimien ominaissähköteho ja rakennuksen ilmanvuotoluku. [1.]

Lähtötiedot E-luvun laskennalle on esitetty Suomen rakennusmääräyskokoelman osan D3 kohdassa 3. Tämä kohta sisältää tiedot laskennan säätiedoista, rakennuksen ilmanvaihdon ilmavirroista, lämmitys- ja jäähdytysrajoista, käyttöajoista ja käyttöasteista sekä lisäksi valaistuksen, kuluttajalaitteiden ja ihmisten rakennukseen aiheuttamasta lämpökuormasta. Lisäksi kohta 3 sisältää tiedot lämpimän käyttöveden vuotuisesta ominaiskulutuksesta ja vuotuisesta lämmitysenergiasta [1]. Edellä mainitut lähtötiedot on annettu rakennusluokkakohtaisesti, ja niitä tulee noudattaa E-lukua laskettaessa. Sellaiset lähtötiedot mitä Suomen rakennusmääräyskokoelman osassa D3 ei ole esitetty, otetaan rakennuksen suunnitteluasiakirjoista [1]. Myös Suomen rakennusmääräyskokoelman osassa D5 on annettu arvoja joita E-lukulaskennassa voidaan käyttää, jos tarkkoja suunnitelmien mukaisia arvoja ei ole saatavilla [9].

On huomattava, että rakennuksen E-lukua laskettaessa on käytettävä standardiarvoja, jotka voivat poiketa huomattavasti suunnitelluista ja rakennuksessa käytettävistä arvoista. Standardikäyttö estää alentamasta E-lukua pienillä ilmanvaihdon ilmavirroilla, lyhyillä rakennuksen käyttöajoilla ja muilla vastaavilla keinoilla, joilla E-lukua voitaisiin alentaa. Standardikäyttö mahdollistaa rakennusten vertailun ja näin ollen yhtenäiset vaatimukset rakennusten E-luvulle.

## **2.2.4 Kesäajan huonelämpötilan hallinta**

Suomen rakennusmääräyskokoelman osassa D3 on määrätty myös rakennuksien yllämpenemisestä seuraavasti:

"2.2.1 Rakennus on suunniteltava ja rakennettava siten, että tilat eivät lämpene haitallisesti. Tilojen yllämpenemisen estämiseksi käytetään ensisijaisesti rakenteellisia ja muita passiivisia keinoja sekä yöllä tehostettua ilmanvaihtoa." [1.]

"2.2.1.1 Kesäajan huonelämpötila ei saa ylittää kohdan 3.2.1 taulukon 2 jäähdytysrajan arvoa enemmän kuin 150 astetuntia 1. kesäkuuta ja 31. elokuuta välisenä aikana kohdan 3.1 säätiedoilla, taulukon 3 sisäisillä lämpökuormilla ja suunnitelluilla ilmamäärillä laskettuna." [1.]

"2.2.3 Kesäajan huonelämpötilan vaatimuksenmukaisuus osoitetaan eri tilatyypin lämpötilalaskennalla." [1.]

"5.2.3 Kesäajan huonelämpötilan laskenta pitää suorittaa dynaamisella laskentatyökä-lulla." [1.]

Toisin sanoen pelkkä rakennuksen E-luvun määräysten mukaisuus ei ole yksin riittävä peruste rakennusluvan myöntämiselle asuinkerrostaloissa. E-luvun lisäksi muun muassa simulointiohjelmalla laskettu astetuntiluku tulee ilmoittaa energiaselvityksessä. Ainoastaan pientalot, rivitalot ja ketjutilat ovat vapautettuja kesäajan ylitämpenemistarkastelusta. Tarkemmat määräykset kesäajan ylitämpenemisen hallinnaksi on esitetty Suomen rakennusmääräyskokoelman osan D3 kohdassa 2.2. [1.]

Asetuntituntiluku saadaan laskettua, kun tiedetään, kuinka kauan sisälämpötila ylittää Suomen rakennusmääräyskokoelman D3 [1] taulukossa 2 esitetyn jäädytysrajan (asuinkerrostalolla 27 °C) jokaista jäädytysrajan ylittävää astetta kohti laskettuna. Asetunnit jokaiselle asteelle saadaan kertomalla jäädytysrajan ylittävien asteiden lukumäärä ajanjakson pituudella (tunneissa ilmoitettuna) jolloin kyseinen sisälämpötila toteutuu. Jos asuinkerrostalon lämpötila on 28 °C kymmenen tuntia vuodessa, tarkoittaa tämä asetuntilukua 10 °Ch. Tähän lisätään asetunnit, jolloin sisälämpötila on 29 °C, 30°C ja niin edelleen niin kauan laskettuna, kunnes saavutetaan tilan lämpötilahuippu, jolloin eri lämpötiloilla lasketusta asetuntien summasta saadaan tilan asetuntiluku.

Kuten aiemmin on mainittu, rakennuksen ylitämpeneminen tulee ehkäistä ensisijaisesti passiivisin keinoin [1]. Asuinkerrostalossa ylitämpeneminen pystytäänkin yleensä ehkäisemään esimerkiksi ominaisuuksiltaan sopivilla ikkunoilla, rakenteilla, lipoilla, parvekkeilla, kaihtimilla tai markiiseilla [2]. Jos tämä ei ole mahdollista, tulee rakennukseen suunnitella ja asentaa jäädytysjärjestelmä, jotta asetuntiluku saadaan Suomen rakennusmääräyskokoelman osan D3 sallimiin rajoihin [1]. Jäädytysjärjestelmän käyttäminen kuitenkin nostaa E-lukua, koska sen energiankulutus otetaan huomioon E-lukua laskettaessa.

Rakennuksen aurinkoenergiasta johtuvan ylitämpenemisen passiivinen ehkäiseminen on ennen ollut osa arkkitehdin työtä, mutta uusien energiamääräysten myötä myös

energiasimulointeja tekevä henkilö on merkittävästi mukana ehkäisemässä rakennuksen yllälämpenemistä.

### **3 AINEISTO JA MENETELMÄT**

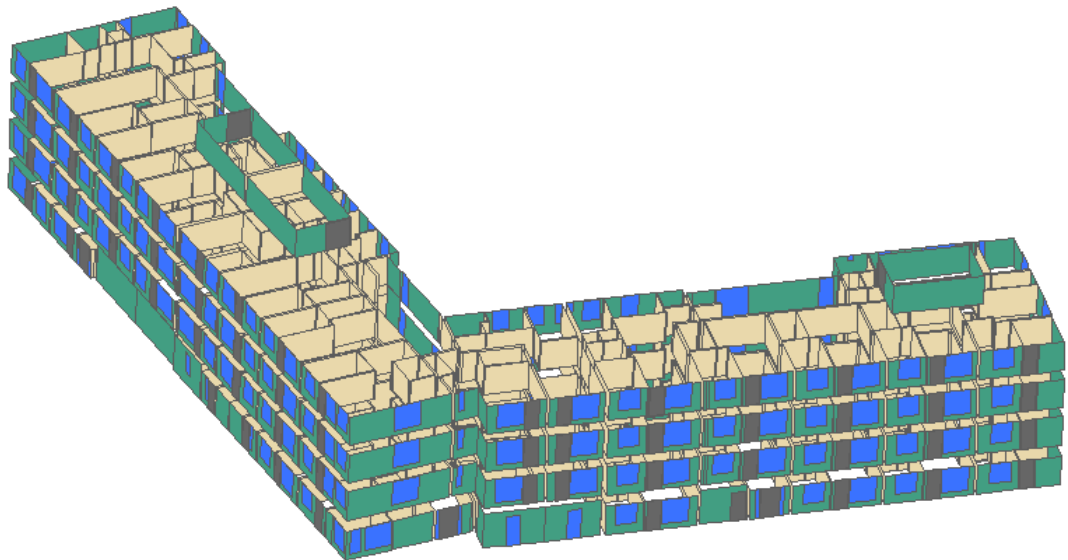
Tämän opinnäytetyön tavoitteena on selvittää E-lukuun vaikuttavien tekijöiden merkitystä, eli kuinka paljon mikäkin tekijä vaikuttaa rakennuksen E-lukuun. Työssä tutkittavien eri tekijöiden vaikutuksien selvittämiseksi valitaan mallikerrostalo, josta tehdään IFC-malli MagiCAD ROOM -ohjelmalla. Tämä IFC-malli tuodaan Granlund Oy:n kehittämään RIUSKA-simulointiohjelmaan, jonka avulla eri tekijöiden vaikutukset pystytään selvittämään.

Koska E-lukuun vaikuttavia tekijöitä on useita, joudutaan työ rajaamaan tiukasti. Tästä syystä työssä keskitytään vain kaukolämpöön liitettävän asuinkerrostalon rakenteellisiin ja taloteknisiin ratkaisuihin, joista valittiin tutkittavaksi yhteensä yhdeksän eri tekijää. Eri tekijöitä selvitettäessä kutakin yksittäistä tekijää muutetaan tarvittaessa vähän kerrallaan, kirjataan tulokset ja verrataan tuloksia perusmalliin. Myös tutkittavien tekijöiden yhteisvaikutuksia selvennetään.

Mallirakennukseksi valittiin nelikerroksinen kerrostalorakennus, jossa on maanvarainen alapohja ja ilmanvaihtokonehuoneet on sijoitettu neljännen kerroksen päälle. Työn alussa luotiin valitusta kerrostalosta perusmalli, jonka järjestelmien yksityiskohdaiset tiedot on listattu myöhemmin tässä luvussa. Taulukossa 1 on esitetty perustietoja valitusta rakennuksesta ja kuvassa 3 rakennuksen 3D-malli RIUSKA-simulointiohjelmassa.

**TAULUKKO 1. Simuloinneissa käytetyn rakennuksen perustiedot**

Ominaisuus	Arvo
Kerrokset	4
Asuntojen koot	1H + K 32 m <sup>2</sup> ... 4H + K 89,5m <sup>2</sup>
Asuntojen lukumäärä	56 kpl
Bruttoala	4550 m <sup>2</sup>
Huoneistoala	3340 m <sup>2</sup>
Kerroskorkeus	3,0 m
Bruttotilavuus	13530 m <sup>3</sup>
Mitoitusarvot / Kohteen sijainti	Säävyöhyke 1 ja sen mukaiset arvot [1; 9].

**KUVA 3. Simuloinneissa käytetyn rakennuksen 3D-malli RIUSKA-simulointiohjelmassa**

Kuvasta 3 huomataan, että RIUSKA ei osaa mallintaa parvekkeita, vaikka ne on piirretty IFC-malliin. Parvekkeet saa kuitenkin mallinnettua lisäämällä ikkunoihin lippoja, jotka varjostavat ikkunoita. Näitä lippoja ei kuitenkaan saa näkymään rakennuksen 3D-mallissa, vaikka ne on syötetty RIUSKA:an. RIUSKA:a käytettäessä on siis olemassa virhemahdollisuus IFC-mallia koskien.

Eri tekijöitä selvitettäessä on otettu huomioon myös rakennuksen kesäaikainen yllämpeneminen, jota koskevat määräykset on esitetty luvussa 3.4. Suomen rakennus-

määräyskokoelman osan D3 [1] mukaan asuinkerrostalon kesäajan yllämpenemistä tutkittaessa tulee simuloida vähintään yhden lämpökuormiltaan suurimman makuuhuoneen ja olohuoneen astetuntiluku, 1.6. - 31.8. välisenä aikana. Tilojen astetuntilukuja simuloitaessa tulee Suomen rakennusmääräyskokoelman osan D3 [1] mukaisesti käyttää suunniteltuja ilmavirtoja. Koska tätä insinöörityötä tehtäessä ei ollut käytössä ilmanvaihtosuunnitelmia, simuloitiin kaikkia tutkittavia tiloja (makuuhuoneita ja olohuoneita) käyttäen ominaisilmavirtaa  $0,5 \text{ dm}^3/\text{s}, \text{m}^2$ , joka on Suomen rakennusmääräyskokoelman osan D2 pinta-ala mitoituksen mukainen [10].

Työssä valittiin tutkittavaksi tilaksi tulosten esityksen yksinkertaistamiseksi vain yksi tila, makuuhuone 418, jonka yllämpenemistä seurataan kaikkien selvitettävien tekijöiden osalta. Tämän tilan 418 lämpökuorma on rakennuksen makuuhuoneista ja olohuoneista suurin. Kyseinen tila 418, jonka avulla yllämpenemistä tutkitaan, sijaitsee rakennuksen idänpuoleisella pitkällä julkisivulla neljännessä kerroksessa. Yleensä suurimman lämpökuorman tila sijaitsee etelän tai lännen puoleisella julkisivulla merkittävän auringon aiheuttaman lämpökuorman takia. Mallikerrostalon etelä- ja länsijulkisivujen parvekkeiden takia suurimman lämpökuorman tila sijoittui kuitenkin itäjulkisivulle. Tilan 418 lisäksi on valittu tarvittavilta osin muitakin tiloja eri tekijöiden aiheuttaman tilojen yllämpenemisen selvittämiseksi.

Tässä insinöörityössä käytetyssä perusmallissa puhaltimien ominaissähköteho (SFP), rakennuksen vaipan ilmanvuotoluku ( $q_{50}$ ) ja rakenteiden lämmönläpäisykertoimet (U-arvot) poikkeavat Suomen rakennusmääräyskokoelman mukaisista normiarvoista. Toisin sanoen tässä insinöörityössä käytetty perusmalli ei vastaa ominaisuuksiltaan vuoden 2013 normitaloa. Muutoksen ansiosta työssä käytettävän perusmallin E-luku on saatu alennettua liki asuinkerrostaloille asetettua E-luvun raja-arvoa, jolloin eri tekijöiden vaikutuksien vertailu on realistisempaa.

Samoin ikkunoiden alhaisella  $g_w$ -arvolla ja rakenteiden U-arvojen muutoksilla on saatu tilan 418 astetuntiluku laskettua sallittuun arvoon, jolloin eri tekijöiden muutosten vaikutukset ovat selvemmin esitettävissä ja vertailtavissa.

Taulukoissa 2 - 6 on esitetty perusmallin tarkemmat E-lukuun vaikuttavat tekniset tiedot, joilla simulointeja alettiin tehdä. Nämä lähtötiedot syötetään RIUSKA-simulointiohjelmaan ja tutkimusta tehtäessä muutetaan yhtä selvitettävää tekijää ker-

rallaan. Muut simulointien lähtötiedot, joita taulukoissa 2 - 6 ei ole esitetty (esimerkiksi rakennuksen standardikäyttöä, säätietoja ja kylmäsiltoja koskevat tiedot) ovat Suomen rakennusmääräyskokoelman osien D3 [1] ja D5 [9] mukaiset.

## TAULUKKO 2. Simuloinneissa käytetyn perusmallin vaipan ominaisuudet

Tekijä	Arvo (jos on)	Huom.
Ulkoseinä, US1	$U_{US1} = 0,16 \text{ W/m}^2\text{K}$	1
Alapohja (maanvarainen), AP1	$U_{AP1} = 0,12 \text{ W/m}^2\text{K}$	1
Yläpohja, YP1	$U_{YP1} = 0,11 \text{ W/m}^2\text{K}$	1
Ikkuna	$U_{IKK} = 1,02 \text{ W/m}^2\text{K}$ $g_w = 31 \%$	2
Ovi	$U_{OVI} = 0,99 \text{ W/m}^2\text{K}$	
Ilmanvuotoluku	$q_{50} = 1,5 \text{ m}^3/\text{h}, \text{m}^2$	
Verhot/kaihtimet	Kaihtimet ikkunoiden sisemmässä välissä	
Muut varjostukset	Parvekkeet, syvyys 2 m. Ei parvekelasituksia. Varjostin-/sadepellit.	3

1. Perusmalli sisältää betonikerrostalon rakenteet. Tarkemmat rakenteiden ominaisuudet on esitetty liitteessä 1.
2. Ikkunoiden valmistaja: Skaala ikkunat ja ovet Oy. Malli: Beeta puu, 550. U-arvo ja  $g_w$ -arvo sisältää mallikohtaiset karmit.
3. Kaksi metriä syvät parvekkeet arkkitehtisuunnitelman mukaisesti etelän ja lännen puoleisilla pitkillä julkisivuilla. Ei parvekelasituksia. Pohjoisen ja idän puoleisilla pitkillä julkisivuilla ikkunoiden päällä 20 cm varjostin-/sadepellit.

## TAULUKKO 3. Simuloinneissa käytetyn perusmallin ilmanvaihtojärjestelmän tiedot

Tekijä	Arvo	Huom.
Ilmanvaihtokoneiden lukumäärä	$n_{ivkone} = 3 \text{ kpl}$	
Ilmanvaihtokoneen tuloilman lämpötilasuhde	$\eta_t = 0,65$	1,2,3
Yhden puhaltimen paineenkorotus	$\Delta p_{puh} = 400 \text{ Pa}$	1,4
Yhden puhaltimen kokonaishyötysuhde	$\eta_{puh,kok} = 0,5$	1,4
Yhden puhaltimen ominaissähköteho	$SFP = 0,8 \text{ kW}/(\text{m}^3/\text{s})$	1,4

Ilman lämpeneminen puhaltimessa	$\Delta t_{\text{ilma,puhallin}} = 0,5 \text{ }^{\circ}\text{C}$	1,2
Ilmanvaihdon huoneistokohtainen tehostus	$E_i$ , $q_{v,\text{omin}} = 0,5 \text{ dm}^3/(\text{s},\text{m}^2)$	1,4
Tulo- ja poistoilmavirran suhde	$R_{\text{LTO}} = 1,0$	1,5
Ilmanvaihdon tarpeenmukainen ohjaus	$E_i$	1
Jäteilman lämpötilarajoitus	$t_{j, \text{min}} = 0 \text{ }^{\circ}\text{C}$	1,3
Tuloilman lämpötila	$t_t = >16 \text{ }^{\circ}\text{C}$	1,6

1. Sama kaikilla kolmella ilmanvaihtokoneella.
2. Voidaan käyttää, kun tarkkoja tietoja laitteistosta ei ole saatavilla [9].
3. Regeneratiivinen lämmönsiirrin.
4. Sama tulo- ja poistoilmapuhaltimella.
5. Koska kohteesta ei ole työtä tehtäessä käytössä ilmanvaihtosuunnitelmia, on tulo- ja poistoilmavirrat pidetty lämmöntalteenotton tuloilman lämpötilasuhdetta simuloitaessa samoina.
6. Tuloilman lämmitystä ohjataan säätökäyrän avulla siten, että ulkoilman ollessa  $5 \text{ }^{\circ}\text{C}$  tai kylmempää, on tuloilman lämpötila  $18 \text{ }^{\circ}\text{C}$ . Ulkoilman lämpötilan ollessa  $16 \text{ }^{\circ}\text{C}$  tai lämpimämpää, on tuloilman lämpötila ulkoilman lämpötila (ei lämmitystä). Ulkoilman ollessa  $16 \text{ }^{\circ}\text{C}$  ja  $18 \text{ }^{\circ}\text{C}$  välillä automatiikka säätää tuloilman lämpötilaa ilmanvaihtokoneen lämmityspatterin lineaarisen säätökäyrän avulla.

#### TAULUKKO 4. Simuloinneissa käytetyn perusmallin lämmitysjärjestelmän tekniset tiedot

Tekijä	Arvo	Huom.
Lämmitysenegiamuoto (tilojen, ilmanvaihdon ja käyttöveden lämmitys)	Kaukolämpö $\eta_{\text{tuotto}} = 0,97$ Energiamuotokerroin 0,7	
Lämpöjohtoja lämmittämättömässä tilassa	$E_i$	
Varaaja lämmitysjärjestelmässä	$E_i$	
Lämmönjako vesiradiaattoreilla ( $70^{\circ}\text{C}/40^{\circ}\text{C}$ , jakojohdot eristetty)	$\eta_{\text{tilat}} = 0,9$	
Lämmitysjärjestelmän sähköenergian kulutus	$W_{\text{lämmitys}} = 10905,5 \text{ kWh/a}$	1

1. Laskettava erikseen Suomen rakennusmääräyskokoelman osan D5 [9] mukaisesti. Laskenta on esitetty liitteessä 2.



**TAULUKKO 5. Simuloinneissa käytetyn perusmallin käyttövesijärjestelmän tekniset tiedot**

<b>Tekijä</b>	<b>Arvo</b>	<b>Huom.</b>
Lämminvesikierto	$\eta_{\text{lkv,siirto}} = 0,97$	
Lämminvesikierron eristys 0,5 D	$\phi_{\text{lkv,kiertohäviö,omin}} = 10 \text{ W/m}$	
Kiertojohdon ominaispituus	$L_{\text{lkv,omin}} = 0,043 \text{ m/m}^2$	1
Käyttövesipattereiden lukumäärä	$n_{\text{lämmityslaite}} = 0 \text{ kpl}$	
Varaaja käyttövesijärjestelmässä	Ei	

1. Voidaan käyttää, kun tarkkoja tietoja laitteistosta ei ole saatavilla [9].

**TAULUKKO 6. Simuloinneissa käytetyn perusmallin muiden järjestelmien tiedot**

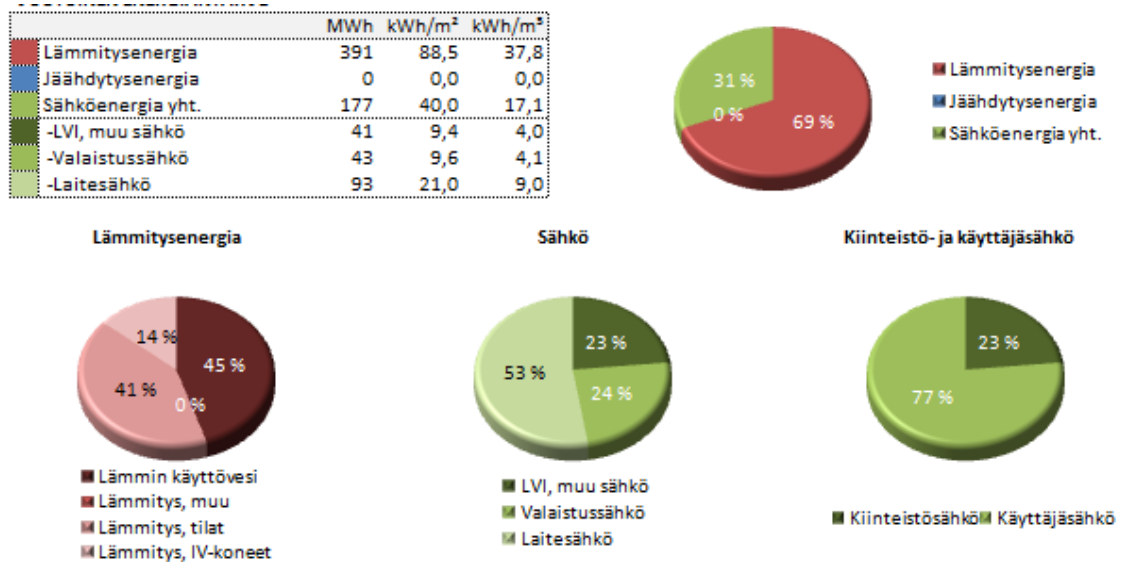
<b>Tekijä</b>	<b>Arvo</b>	<b>Huom.</b>
Aurinkokeräimet	Ei	
Aurinkopaneelit	Ei	
Muut "ilmaisenergian" lähteet	Ei	
Jäähdytysjärjestelmä	Ei	

Edellä mainituilla tiedoilla perusmallin energiatuloksiksi saadaan:

- Rakennuksen E-luku:  $130,2 \text{ kWh/(m}^2\text{a)}$
- Tilan 418 astetuntiluku:  $126 \text{ °Ch}$

E-luku  $130,2 \text{ kWh/(m}^2\text{a)}$  ei aivan alita uusien energiamääräyksien [1] asettamaa rajaa asuinkerrostalon E-luvulle, joka on  $130,0 \text{ kWh/(m}^2\text{a)}$ . Astetuntiluku  $126 \text{ °Ch}$  alittaa sallitun rajan ( $150 \text{ °Ch}$ ) selvästi.

Kuvassa 4 on esitetty RIUSKA:sta saatava perusmallin vuotuinen energian tarve. Kuvasta havaitaan, että lämmitysenergian tarve kattaa vuotuisesta energian tarpeesta 69 %. Loput 31 % on sähkönkulutusta. Lämmitysenergian kohdalla suurin energian kuluttaja on käyttöveden lämmitys 45 % osuudella. Likimain yhtä suuri määrä lämmitysenergiaa kuluu tilojen lämmitykseen (41 %). Loput 14 % kuluu ilmanvaihdon lämmitykseen. Sähköenergian osalta kuluttajalaitteiden sähkön kulutus on suurin kattaen yli puolet koko sähköenergiankulutuksesta. Loppu sähköenergian bruttotarpeesta kuluu valaistussähköön ja LVI-laitesähköön likimain yhtä suurilla osuuksilla.



**KUVA 4. Perusmallin vuotuinen bruttoenergiantarve (sisältää järjestelmähäviöt)**

Kuvan 4 perusteella voidaan todeta, että suurimmat perusmallin energiankuluttajat ovat lämmin käyttövesi ja tilojen lämmitys, joissa on täten eniten säästöpotentiaalia. Toisaalta sähköenergian kulutuksen vähentäminen alentaisi suhteessa enemmän E-lukua sähkön suuren energiamuotokertoimen takia.

#### 4 SIMULOINTIEN TULOKSET

Tässä luvussa on esitetty simulointien tulokset ja käsitelty kunkin työssä tutkittavan E-lukuun vaikuttavan tekijän merkitystä yksi kerrallaan sekä esitetty näihin tekijöihin vaikuttavia talo- ja rakennusteknisiä ominaisuuksia. Luvussa 4.10 on esitetty esimerkki eri tekijöiden yhteisvaikutuksesta E-lukuun. Tarkat simulointien tulokset on esitetty liitteissä 3 - 11 ja 13 - 14.

Tuloksissa ei ole otettu huomioon, onko tutkitut rakennuksen rakenteelliset ja talotekniset ominaisuudet mahdollista tai järkevää toteuttaa käytännössä. Rajoittaviksi tekijöiksi voivat muodostua esimerkiksi investointikustannukset, huoltokustannukset tai järjestelmien rakennusteknisesti mahdoton toteuttaminen. Nämä seikat riippuvat olennaisesti muun muassa valmistajien laitteista tai rakennusmateriaaleista ja niiden energiatehokkuudesta. Esimerkiksi rakennuksen ilmanvuotoluku  $0,2 \text{ m}^3/(\text{h}, \text{m}^2)$  on jo niin pieni, että yhtä ilmatiiviin rakennuksen rakentaminen käytännössä on nykypäivänä hyvin vaikeaa. Samoin 60 % osuuden tuottaminen kerrostalorakennuksen sähköenergiantarpeesta aurinkopaneelien avulla on haastavaa. Tämä tarkoittaisi käytännössä

aurinkopaneelien pinta-alan kasvattamista niin suureksi, että järjestelmän investointi ei ole tänä päivänä taloudellisesti kannattavaa. Toisin sanoen tässä työssä on keskitytty vain rakennuksen E-lukuun vaikuttavien tekijöiden selvittämiseen.

On huomattava, että rakennusta suunniteltaessa kaikkien rakennusten rakenteellisten ja taloteknisten järjestelmien on lisäksi vastattava Suomen rakennusmääräyskokoelman eri osien määräyksiä. Energiatohokkuutta ei voida parantaa esimerkiksi rakennuksen terveellisen, turvallisen ja viihtyisän sisäilmaston kustannuksella.

#### 4.1 Vaipan johtumislämpöhäviöt

Vaipan johtumislämpöhäviöihin vaikuttavat rakenteiden lämmönläpäisykertoimet, eli U-arvot. Rakenteen U-arvoon voidaan vaikuttaa alentavasti rakenteiden eristepaksuutta lisäämällä ja käyttämällä rakennemateriaaleja, joiden lämmönjohtavuus  $\lambda$  on pieni. Eristeen lisäksi myös rakenteissa käytettävien muiden rakennemateriaalien paksuuden kasvattaminen pienentää rakenteen U-arvoa.

On huomattava, että rakennuksen vaipan energiatohokkuus ei riipu ainoastaan rakenteiden U-arvoista, vaan myös rakenteen lämmönvarastointikyvystä, joka taas riippuu rakennusosan eristeen sisäpuolisesta lämpökapasiteetista [3; 9]. Täten betoniseinä varastoi lämpöä puurunkoista seinää enemmän. Tämän takia työssä on tutkittu rakennuksen E-lukua rakenteiden U-arvoista riippuvaisena kahden eri laskentatapauksen avulla. Ensimmäinen laskentamalli sisältää perusmallin betonirakenteet ja toinen laskentamalli puurunkoisen kerrostalon rakenteet. Rakenteiden tarkat tiedot on esitetty liitteessä 1. Tässä insinöörityössä rakenteiden U-arvon muutoksen vaikutusta rakennuksen E-lukuun on tutkittu muuttamalla rakenteiden eristepaksuuksia, jolloin eristeen sisäpuolinen lämpökapasiteetti pysyy vakiona.

Opinnäytetyössä valittiin ylälämpenemisen tutkimiseksi tila 418, joka sijaitsee ylimässä kerroksessa, ja siinä on ulkoseinän lisäksi kaksi ikkunaa. Täten tila soveltuu yläpohjan, ulkoseinien ja ikkunoiden U-arvojen vaikutuksen selvittämiseksi kyseisen tilan astetuntilukuun. Alapohjan ja ovien U-arvojen vaikutuksen selvittämiseksi tilojen ylälämpenemiseen valittiin tarkasteltavaksi tilan 418 lisäksi tila 126. Tämä siksi, että vain ne rakenteet, joihin tila rajoittuu vaikuttavat tilan ylälämpenemiseen.

Uusissa energiamääräyksissä [1] on E-luvun määrittämiseksi annettu suurimmat sallitut arvot rakennuksen vaipan lämmönläpäisylle. Nämä arvot ovat kuitenkin hyvin väljät ja usein tasauslaskenta asettaa tiukemmat rajat rakennuksen vaipan U-arvoille. E-luvun laskennassa suurimmat sallitut U-arvot ja tasauslaskennan vertailulämpöhäviön U-arvot (lämpimälle tilalle) on esitetty taulukossa 7 [1]. Suomen rakennusmääräyskoelman osassa D3 [1] on esitetty vaatimukset, joiden perusteella E-lukulaskennan suurimmista sallituista arvoista saadaan poiketa.

**TAULUKKO 7. E-lukulaskennan suurimmat sallitut rakennuksen vaipan U-arvot ja tasauslaskennassa käytettävät vertailulämpöhäviön U-arvot [1]**

Rakenneosa	U (W/(m <sup>2</sup> K))	
	E-lukulaskenta	Vertailulämpöhäviö
Yläpohja	0,6	0,09
Alapohja (ulkoilmaan rajoittuva)	0,6	0,09
Alapohja (ryömintätilaan rajoittuva)	0,6	0,17
Maatavasten oleva rakenneosa	0,6	0,16
Ulkoseinä	0,6	0,17
Hirsiseinä	0,6	0,40
Ikkuna	1,8	1,0
Ovi	1,8	1,0

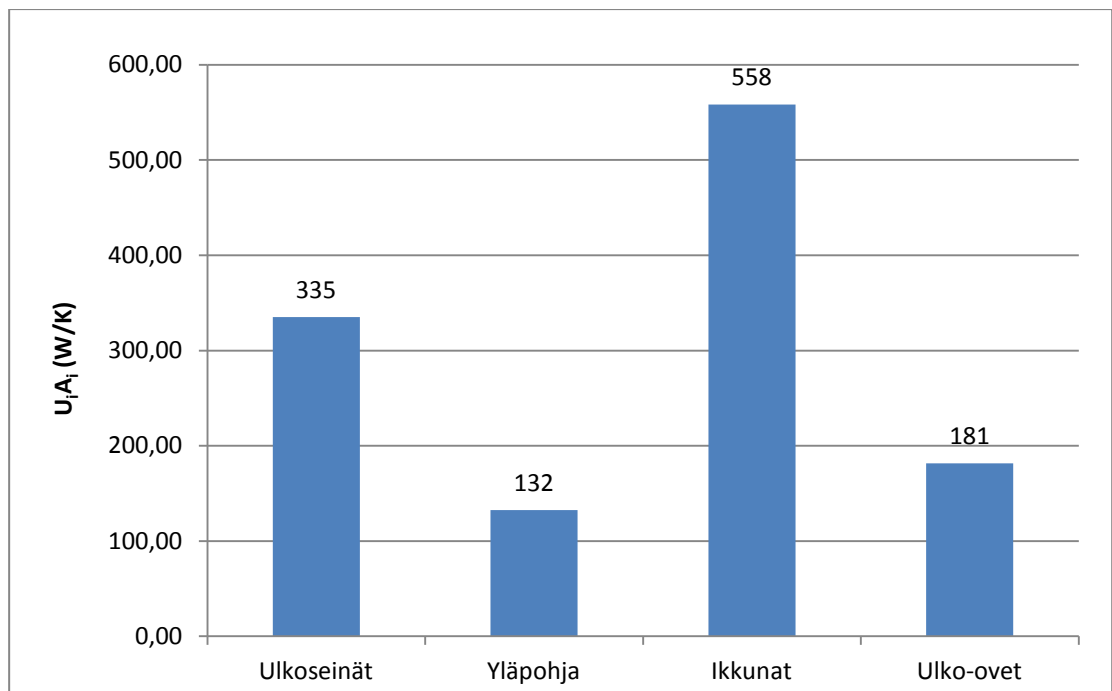
Rakennuksen rakenneosan  $i$  johtumislämpöhäviöstä aiheutuva lämmitysenergiantarve riippuu rakenteen U-arvosta ja pinta-alasta, ulkolämpötilan pysyvyydestä, sisälämpötilasta ja ulkoilman lämpötilasta kaavan (2) mukaisesti.

$$Q_{rakenneosa,i} = U_i A_i \sum \Delta T_{tu} (t_s - t_u) \quad (2)$$

Koska kaavassa (2)  $\Delta T_{tu}$  ja  $(t_s - t_u)$  ovat samat kaikkien ulkoilmaan rajoittuvien rakenneosien kesken (olettaen, että eri tilojen sisälämpötila on sama), riippuu rakennusosan johtumislämpöhäviöistä aiheutuva lämmitysenergiantarve sen U-arvosta ja pinta-alasta. Maanvaraisen rakenneosan kohdalla mitoittava ulkolämpötila on eri kuin ilman rajoittuvalla rakenneosalla, eikä sitä täten voida vertailla muiden rakenneosien

kesken tällä menetelmällä. Simulointiohjelmasta saatavasta lämpöhäviölaskelmasta kuitenkin selviää, että alapohja kattaa vuotuisesta johtumislämpöhäviöiden aiheuttamasta lämmitysenergian kulutuksesta likimain yhtä suuren osan kuin yläpohja.

Edellä olevan teorian perusteella ulkoilmaan rajoittuvien rakenneosien energiatehokkuutta voidaan tutkia vertailemalla tekijää  $U_i A_i$ , joka on siis rakenneosan  $i$   $U$ -arvo kerrottuna rakenneosan  $i$  pinta-alalla. Perusmallin rakenneosien pinta-alat kerrottuna niiden  $U$ -arvoilla on esitetty kuvassa 5.

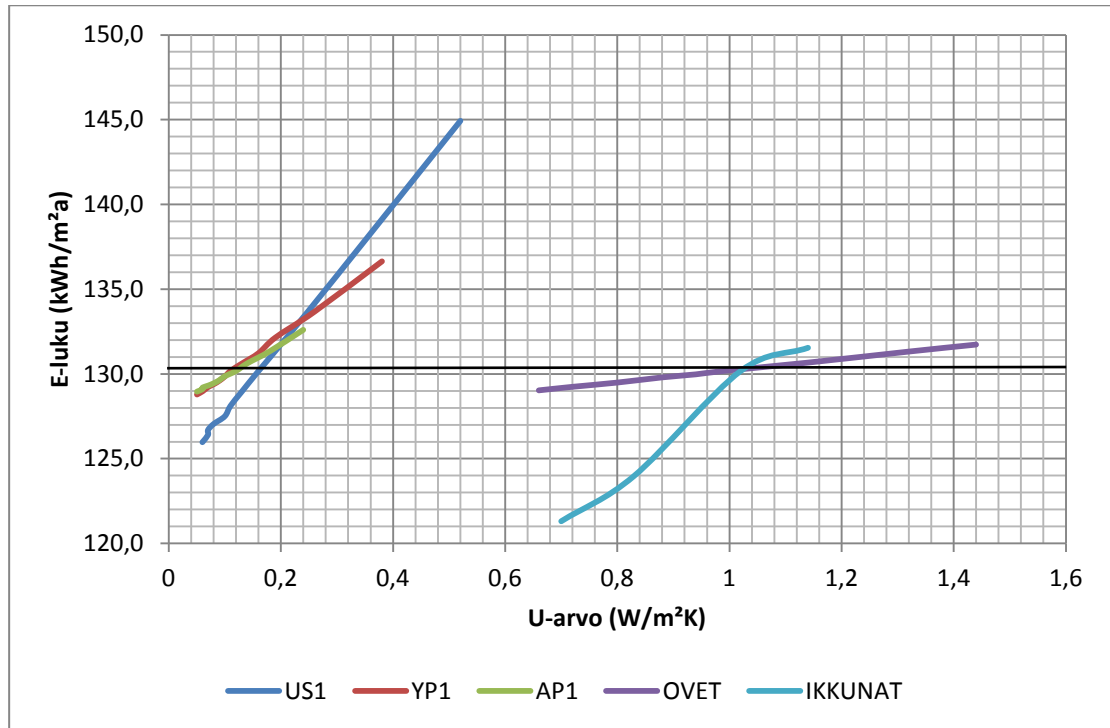


**KUVA 5. Perusmallin rakenneosien  $U$ -arvot kerrottuna niiden pinta-aloilla**

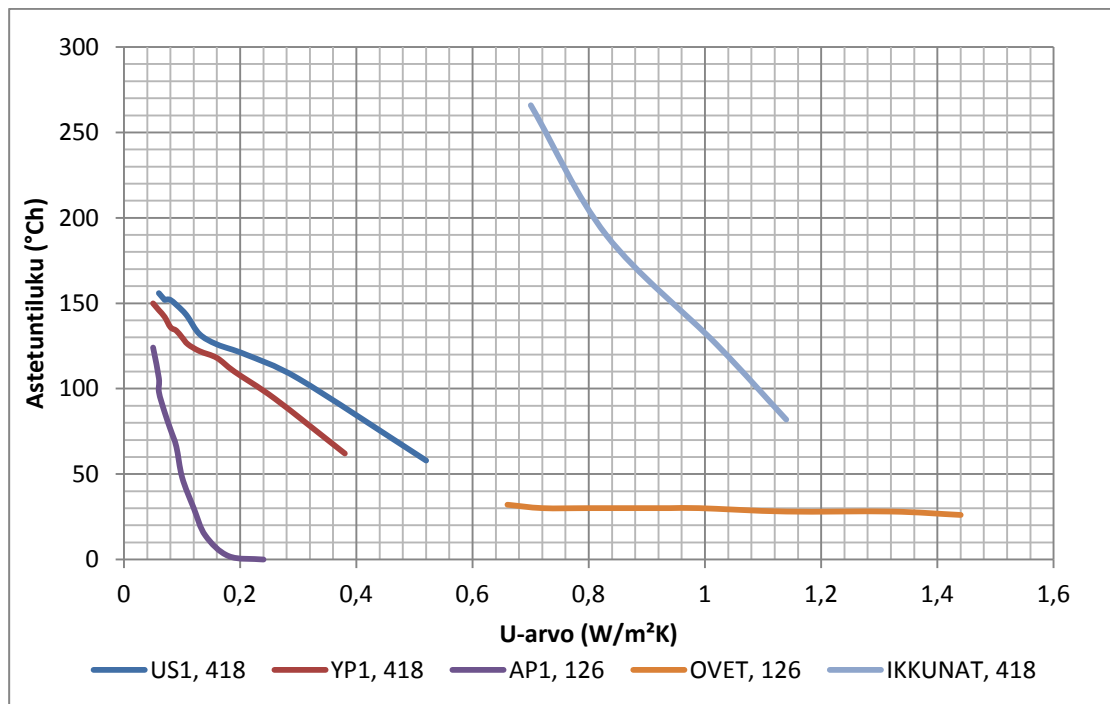
Kuvan 5 perusteella voidaan todeta, että ikkunat ovat johtumislämpöhäviön osalta mallirakennuksen heikoin kohta, toiseksi heikoimmat ovat ulkoseinät. Yläpohja on vertailluista rakenteista energiatehokkain.

Kuvan 5 ja simulointiohjelmasta saatavan lämpöhäviölaskelman perusteella ylä- ja alapohjaa voidaan pitää rakennuksen vaipan energiatehokkaimpina osina johtumislämpöhäviöitä tarkasteltaessa. Tämä antaa pohjaa sille, että ylä- ja alapohjan eristepaksuuden lisäyksellä ei tulla saavuttamaan yhtä suurta etua kuin ulkoseinien lisäeristyksellä tai pienemmän  $U$ -arvon ikkunoilla.

Kuvassa 6 on esitetty tulokset betonikerrostalon rakenteiden U-arvojen vaikutuksista rakennuksen E-lukuun sekä kuvassa 7 betonikerrostalon rakenteiden U-arvojen vaikutuksista eri tilojen astetuntilukuihin. Tarkat betonikerrostalon rakenteiden U-arvoja koskevat simulointien tulokset on esitetty liitteessä 3.

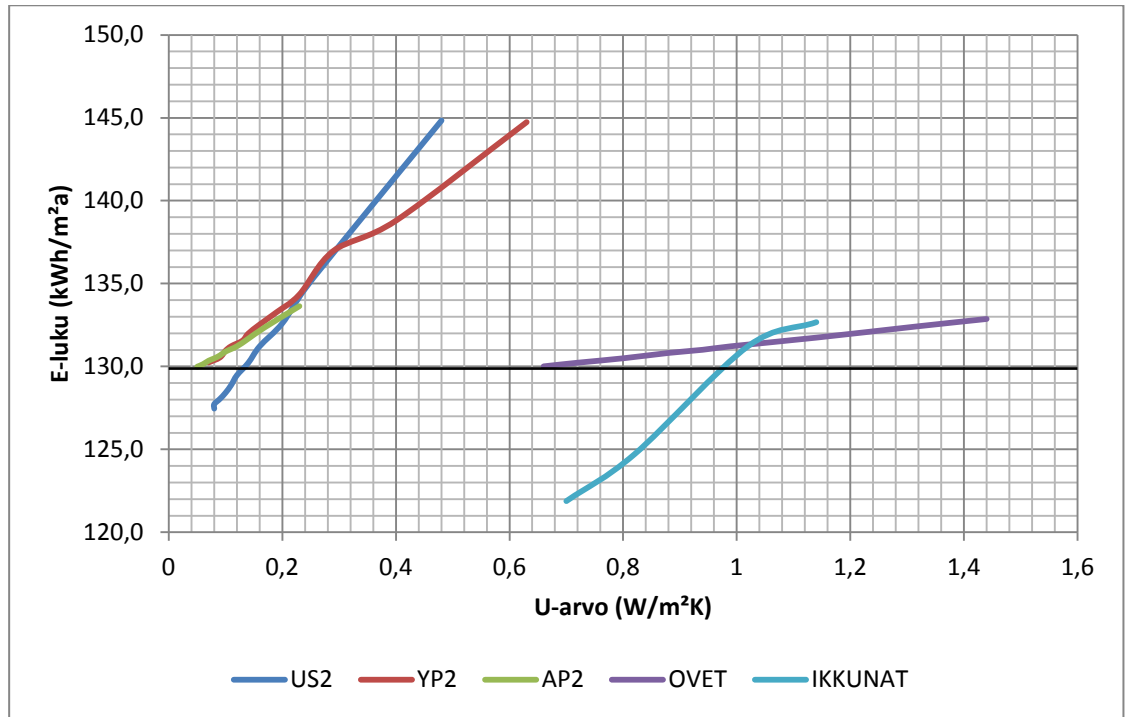


**KUVA 6. Betonikerrostalon E-luku rakenteiden U-arvojen funktiona**

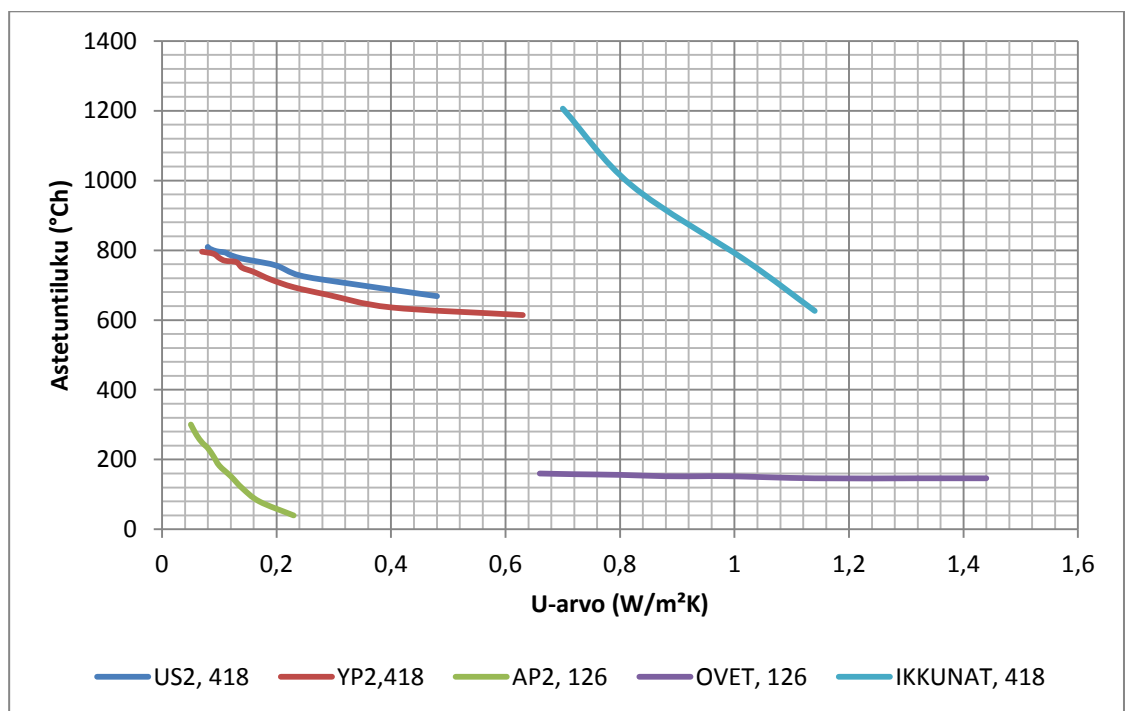


**KUVA 7. Betonikerrostalon eri tilojen astetuntiluvut rakenteiden U-arvojen funktiona**

Kuvassa 8 on esitetty tulokset puukerrostalon rakenteiden U-arvojen vaikutuksista rakennuksen E-lukuun sekä kuvassa 9 puukerrostalon rakenteiden U-arvojen vaikutuksista eri tilojen astetuntilukuihin. Puukerrostalon rakenteiden U-arvoja koskevat tarkat simulointien tulokset on esitetty liitteessä 4.



**KUVA 8. Puukerrostalon E-luku rakenteiden U-arvojen funktiona**



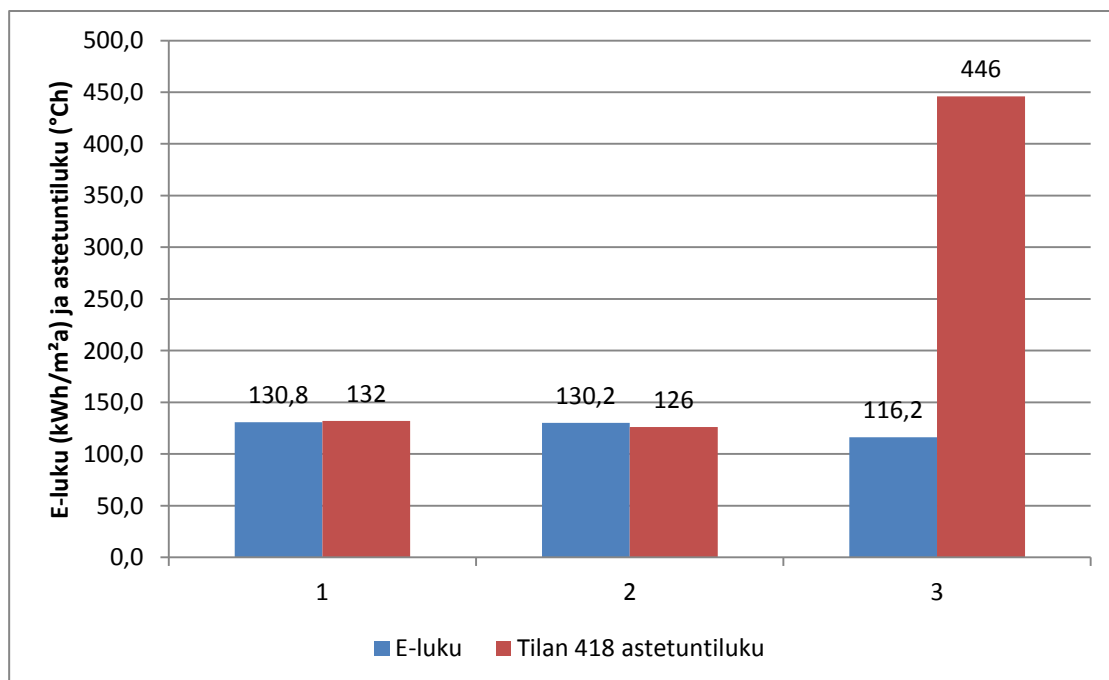
**KUVA 9. Puukerrostalon eri tilojen astetuntiluvut rakenteiden U-arvojen funktiona**

Tässä insinöörityössä tutkittiin myös vaipan eri osien U-arvojen yhteisvaikutuksia rakennuksen E-lukuun. Eri vaipanosien U-arvoista voidaan luoda lukuisia erilaisia yhdistelmiä. Tätä tutkimusta varten luotiin kolme eri rakennuksen vaipan lämmöneristävyyssratkaisua. Simuloinneissa muut rakennuksen rakenteelliset ja talotekniset ominaisuudet pidettiin perusmallia vastaavina. Simuloinneissa käytettyjen betonikerrostalon rakenteiden yksityiskohtaiset U-arvot on esitetty liitteessä 3 ja puukerrostalon vastaavasti liitteessä 4.

Työssä simuloidut lämmöneristävyyssratkaisut ovat:

1. Tasauslaskennassa käytettävät Suomen rakennusmääräyskokoelman osan D3 mukaiset vertailulämpöhäviön U-arvot [1]
2. Perusmallin U-arvot
3. Energiatavokkaan rakennuksen U-arvot.

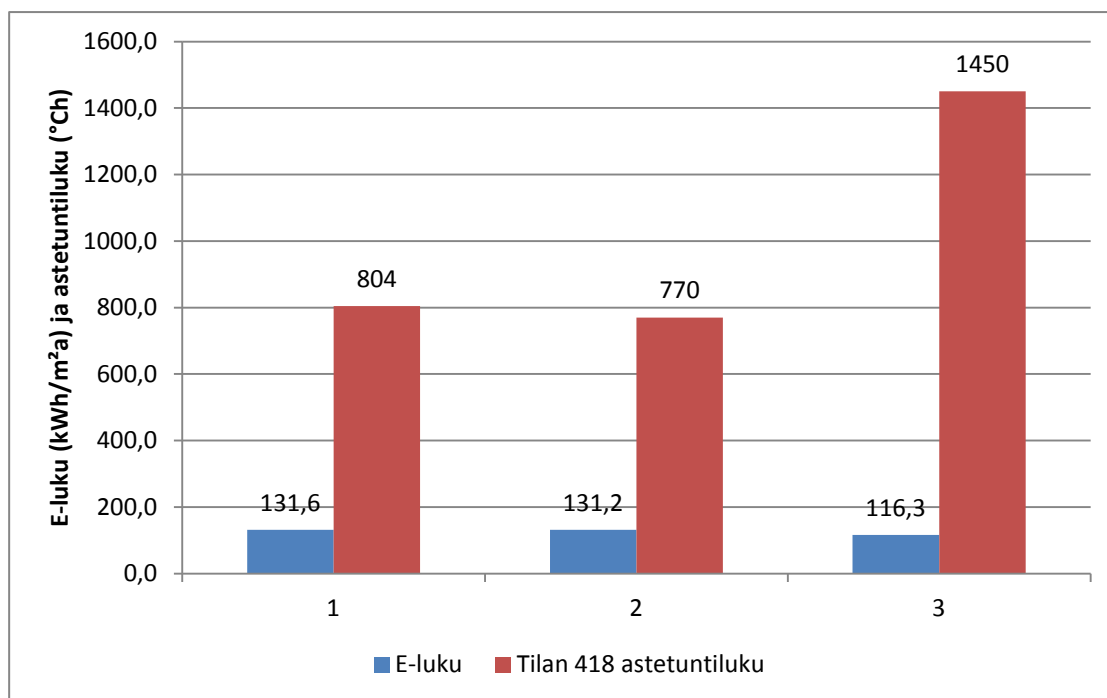
Kuvassa 10 on esitetty betonikerrostalon rakenteiden U-arvojen yhteisvaikutukset rakennuksen E-lukuun ja tilan 418 astetuntilukuun. Yksityiskohtaiset simulointien tulokset on esitetty liitteessä 3.



**KUVA 10. Betonikerrostalon rakenteiden U-arvojen yhteisvaikutukset rakennuksen E-lukuun ja tilan 418 astetuntilukuun**



Kuvassa 11 on esitetty puukerrostalon rakenteiden U-arvojen yhteisvaikutukset rakennuksen E-lukuun ja tilan 418 astetuntilukuun. Yksityiskohtaiset simulointien tulokset on esitetty liitteessä 4.



**KUVA 11. Puukerrostalon rakenteiden U-arvojen yhteisvaikutukset rakennuksen E-lukuun ja tilan 418 astetuntilukuun**

## 4.2 Ikkunoiden pinta-alat

Ikkunoiden pinta-ala vaikuttaa rakennuksen E-lukuun, koska ikkunalla on tyypillisesti seinää huomattavasti heikompi U-arvo. Kun ikkunapinta-ala kasvaa, kasvaa myös johtumisesta aiheutuva lämmitysenergian tarve ja näin ollen E-luku. Toisaalta isommista ikkunoista pääsee enemmän auringosta tulevaa säteilyenergiaa huoneisiin, joka puolestaan pienentää lämmitysenergian tarvetta ja E-lukua, mutta aiheuttaa myös rakennukseen suuren lämpökuorman kesäaikaan, jolloin astetuntiluku kasvaa helposti liian suureksi.

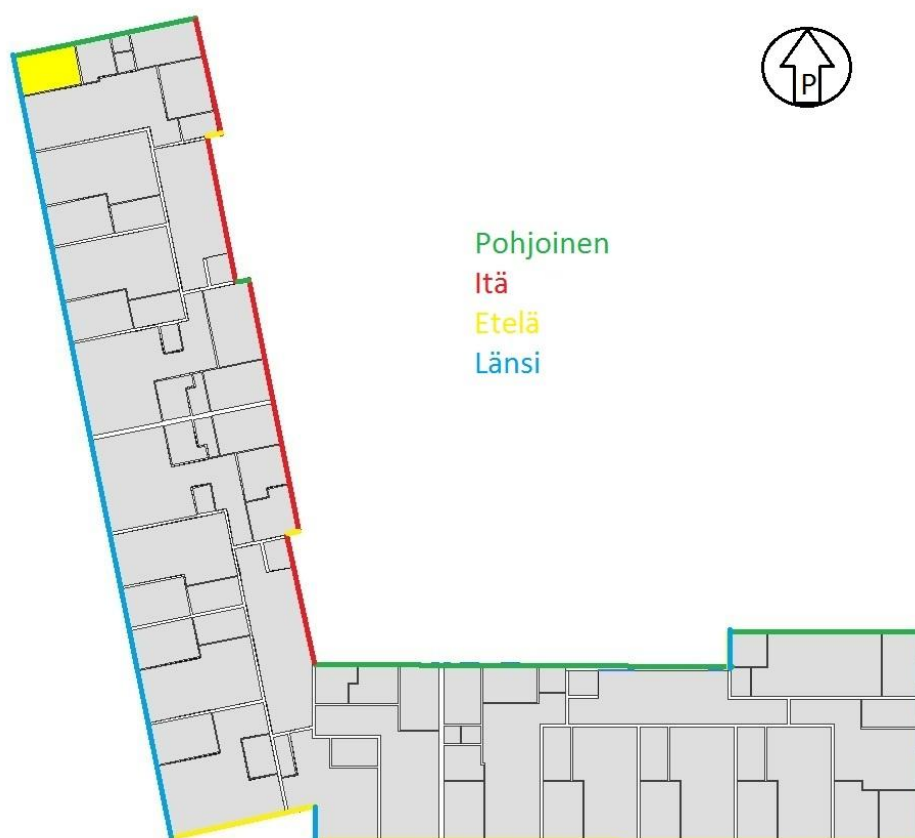
Ikkunoiden pinta-ala vaikuttaa myös rakennuksen valaistusominaisuuksiin, jotka tulee huomioida ikkunoiden kokoa valittaessa. Uusissa energiamääräyksissä on annettu valaistukselle standardikäytön mukainen arvo, joka on E-lukua laskettaessa aina sama, vaikka rakennuksessa on minkä kokoiset ikkunat hyvänsä. Ikkunoiden energiatehok-

kuuteen vaikuttaa U-arvon lisäksi  $g_w$ -arvo, joka on tässä työssä ikkunan kokoa tutkittaessa pidetty vakiona ( $g_w = 31 \%$ ).

Ikkunoiden pinta-alojen määrittäminen kuuluu arkkitehdin tehtäviin, mutta energiasimulointeja tekevä henkilö voi ehdottaa ikkunapinta-alojen muuttamista E-luvun tai astetuntiluvun alentamiseksi. Suotuisa ikkunoiden pinta-ala on tyypillisesti 11-20 % rakennuksen asuinpinta-alasta [3]. Tässä insinöörityössä käytetyn perusmallin ikkunoiden pinta-ala oli 12,4 % eli suhteellisen alhainen.

Koska auringon säteily kohdistuu enemmän rakennuksen etelä- ja länsijulkisivuille, on näiden puoleisten ikkunoiden pinta-aloilla suurempi vaikutus rakennuksen E-lukuun (olettaen että ikkunoita ei varjosteta, tai varjostetaan samalla tavalla kaikkien julkisivujen kesken). Tämän takia jokaisen julkisivun ikkunoiden pinta-alan vaikutus rakennuksen E-lukuun tulee selvittää erikseen. Eri julkisivujen ikkunapinta-alan lisäksi tässä insinöörityössä tutkitaan rakennuksen kaikkien ikkunoiden pinta-alan vaikutusta rakennuksen E-lukuun.

Perusmallin ikkunoiden kokonaispinta-ala on  $550 \text{ m}^2$ , joka jakautuu eri ilmansuunnille seuraavasti: pohjoinen  $90,2 \text{ m}^2$ , itä  $118,1 \text{ m}^2$ , etelä  $148,8 \text{ m}^2$  ja länsi  $191,9 \text{ m}^2$ . Kuvasta 12 nähdään, miten rakennuksen julkisivut on jaettu eri ilmansuunnille.



**KUVA 12. Rakennuksen julkisivujen jakautuminen eri ilmansuuntien kesken**

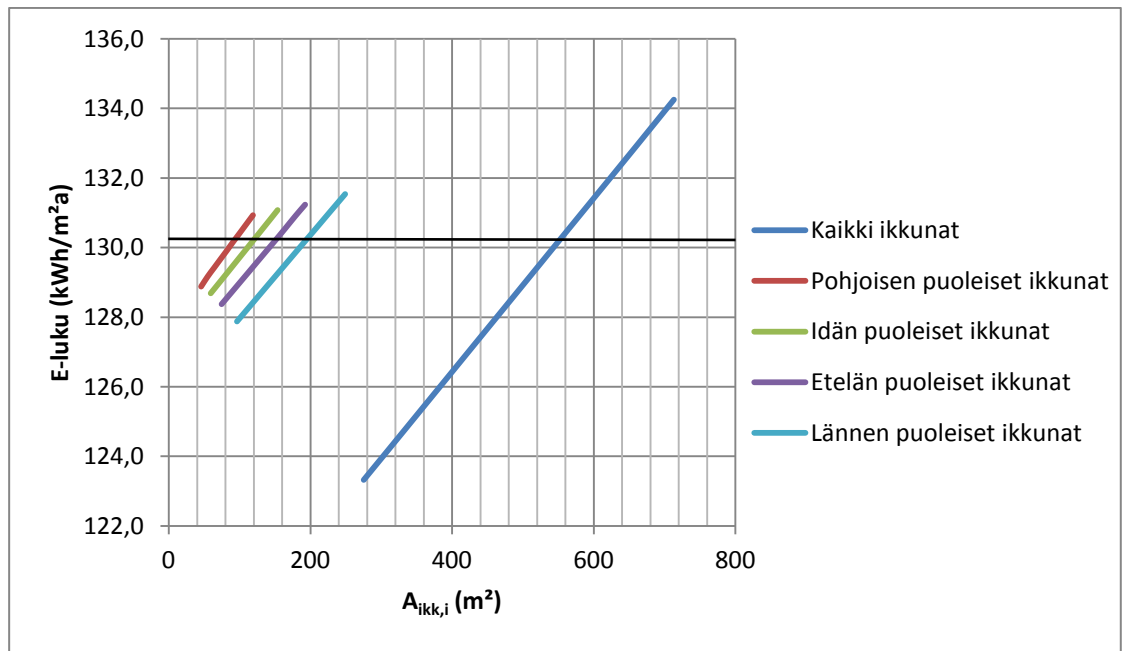
On huomattava, että rakennuksen pitkillä etelä- ja länsijulkisivuilla on koko matkalla syvyydeltään kahden metrin parvekkeet. Tämä vaikuttaa etelän ja lännen puoleisten julkisivujen lämpökuormaan oleellisesti. Jos tutkimus olisi tehty ilman parvekkeita, olisi etelän ja lännen puoleisten ikkunoiden pinta-aloilla ollut selvästi suurempi vaikutus tilojen astetuntilukuihin, joita parvekkeet varjostavat, sekä rakennuksen E-lukuun.

Ikkunoiden pinta-alojen vaikutusta rakennuksen E-lukuun tutkittiin muuttamalla ikkunoiden kokoja simulointiohjelmaan siten, että jokaista tarkasteltavan ilmansuunnan ikkunan kokoa pyrittiin muuttamaan 10 % kerrallaan. Tutkimuksessa suurimpia ikkunoita tarkasteltaessa joidenkin ikkunoiden kohdalla koosta jouduttiin tinkimään, koska ulkoseinän pinta-ala rajoittaa ikkunan pinta-alaa. Tämä ei kuitenkaan heikennä tulosten luotettavuutta, koska tuloksiin on kirjattu ikkunan pinta-ala, johon simuloinneissa todellisuudessa on päästy ja kyseistä pinta-alaa vastaavat tulokset.

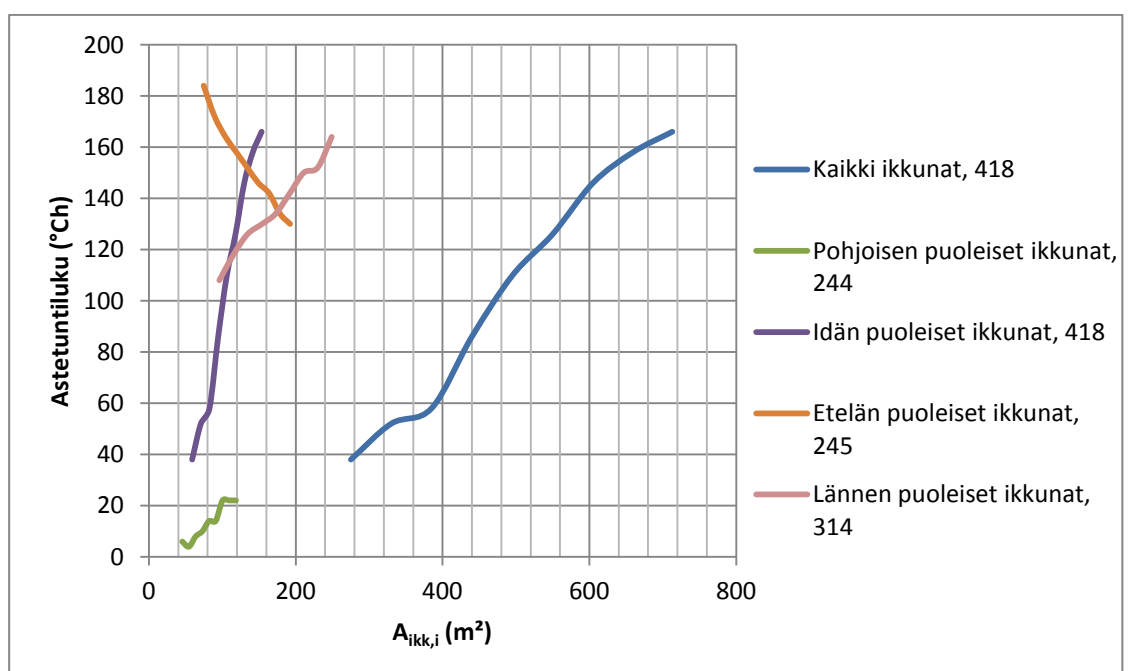
Ikkunoiden aiheuttaman tilojen ylikämmenemisen tutkimiseksi on idän puoleisen tilan 418 lisäksi valittu muiden ilmansuuntien tutkimiseen tila 244 (pohjoinen), tila 459

(etelä) ja tila 314 (länsi), koska vain sen julkisivun ikkunoiden kokojen muutos vaikuttaa yksittäisen tilan astetuntilukuun, jolla tila sijaitsee.

Kuvassa 13 on esitetty ikkunoiden pinta-alojen vaikutukset rakennuksen E-lukuun ja kuvassa 14 ikkunoiden pinta-alojen vaikutukset eri tilojen astetuntilukuihin eri julkisivujen ikkunoilla. Tarkat ikkunoiden pinta-aloja koskevat simulointien tulokset on esitetty liitteessä 5.



**KUVA 13. Rakennuksen E-luku ikkunapinta-alan funktiona eri julkisivuilla**



**KUVA 14. Eri tilojen astetuntiluku eri julkisivujen ikkunapinta-alan funktiona**

### 4.3 Parvekelasitukset

Parvekelasituksien vaikutus rakennuksen E-lukuun perustuu siihen, että pienempi osa auringon säteilyenergiasta pääsee huoneeseen kuin tapauksessa, jolloin ei käytetä parvekelasituksia. Auringon energiaa voidaan hyödyntää kylmään aikaan, koska se laskee rakennuksen lämmitystarvetta. Toisaalta auringon säteilyenergia voi aiheuttaa tilojen yllilämpenemistä varsinkin kesäisin, jolloin auringon lämpösäteily aiheuttaa monesti tiloihin suurimman lämpökuorman. Auringon säteilyenergiasta siirtyy merkittävä osa tilojen lämpöenergiaksi varsinkin keväisin, koska aurinko paistaa tällöin matalalta eivätkä rakennuksen katto tai muut rakenteet pääse varjostamaan rakennuksen ikkunoita.

Parvekelasituksia käytettäessä merkittävään osaan nousee parvekelasin ST-arvo, joka ilmoittaa, kuinka suuri osa auringon säteilyenergiasta pääsee lasin lävitse. ST-arvon perusteella voidaan määrittää ikkunan  $g_g$ -arvo joka on tyypillisesti ST-arvoa hieman suurempi [2]. Ikkunan  $g_g$ -arvo ottaa huomioon auringosta suoraan sisälle säteilevän energian lisäksi lasin lämpenemisen ja sitä kautta aiheutuvan konvektion huoneeseen [2]. Ikkunan  $g_g$ -arvon perusteella voidaan edelleen määrittää lasin  $g_w$ -arvo, joka puolestaan kuvaa, kuinka paljon auringon energiasta siirtyy koko ikkunan kautta rakennukseen [11]. Täten  $g_w$ -arvo ottaa huomioon myös ikkunan karmit ja  $g_g$ -arvo pelkän lasin osuuden [11].

Markkinoilla on nykyään saatavilla laaja valikoima erilaisia lasiratkaisuja. Erot erilaisien lasien kesken voivat olla huomattavia. Esimerkiksi kirkasta auringonsuojalasia käytettäessä auringonsäteilystä pääsee lävitse noin puolet verrattuna kirkkaaseen lasiin [2; 3]. Näiden eroja ei silmällä juurikaan huomata, ja valonläpäisevyyskin on likimain sama [2; 3]. Lumon Oy:n valmistamassa, eniten myydyssä 6 mm karkaistussa parvekelasissa ST-arvo on 82 % [12].

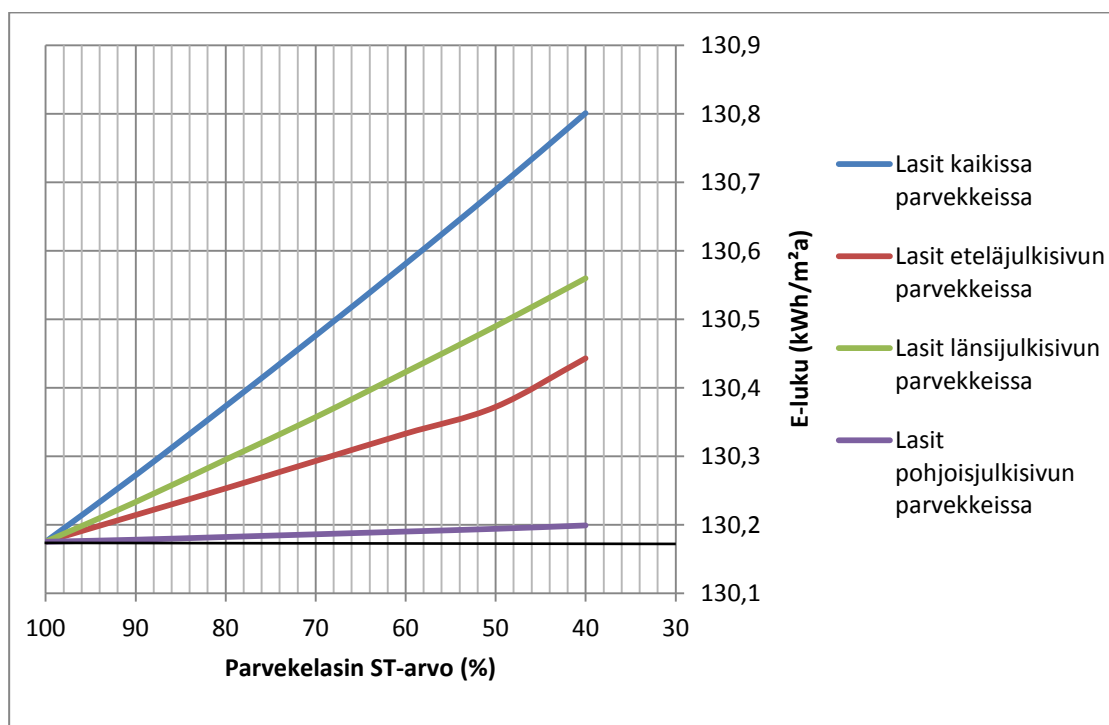
Kuten aiemmin on mainittu, RIUSKA ei osaa simuloida parvekkeita omana tilana vaan ne kuuluu lisätä simulointiohjelmaan manuaalisesti lisäämällä ikkunoihin lippoja. Työssä käytetyssä perusmallissa on parvekkeet etelän ja lännen puoleisilla pitkillä julkisivuilla kerroksissa 2, 3 ja 4 (katso kuva 12). Lisäksi rakennuksen itäosassa pohjoisen puoleisella julkisivulla on kaksi metriä syvät parvekkeet kerroksissa 2,3 ja 4.

Parvekkeisiin voidaan mallintaa parvekelasitukset lisäämällä RIUSKA:ssa ikkunoihin niin sanottu "peittolevy". Kun peittolevyn läpäisyyn syötetään parvekelasin ST-arvo, saadaan ohjelma mallintamaan parvekkeet, joissa on parvekelasitukset.

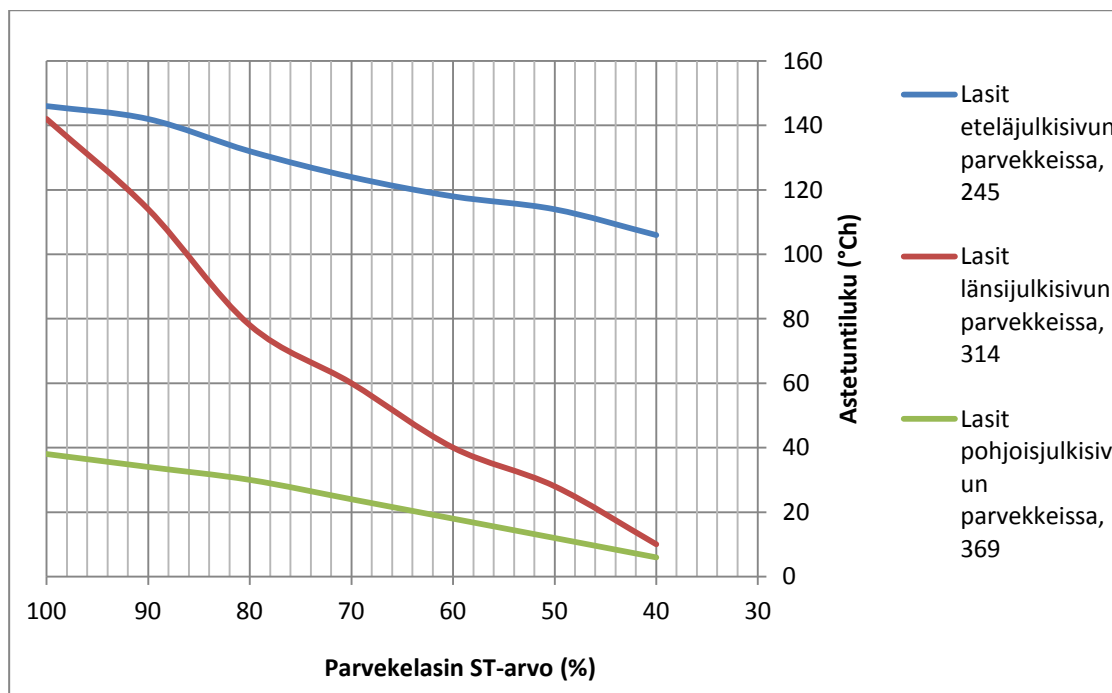
Koska parvekkeita ei saada mallinnettua omana tilanaan, vaan lisäämällä ikkunoihin peittolevy ei tulos ole täysin luotettava. Oikeassa tilanteessa auringon säteilyn osuus myös parvekkeella oleviin rakenteisiin pienenee parvekelasituksien myötä. Simuloitavassa tilanteessa peittolevy varjostaa vain parvekkeella olevaa ikkunaa.

Koska parvekelasituksen vaikutus E-lukuun riippuu olennaisesti parvekelasin ST-arvosta, tutkittiin tässä insinöörityössä E-lukua asettamalla yhden ilmansuunnan parvekkeisiin lasitukset ja muuttamalla parvekelasin ST-arvoa vähän kerrallaan. Tilanne, jossa lasin ST-arvo on 100 %, vastaa tilannetta, jossa ei ole parvekelasituksia, eli tämän työn perusmallin tilannetta.

Tarkat parvekelasituksia koskevat simulointien tulokset on esitetty liitteessä 6. Parvekelasin ST-arvon vaikutus rakennuksen E-lukuun eri julkisivujen parvekkeiden kesken on esitetty kuvassa 15. Parvekelasin ST-arvon vaikutus eri tilojen astetuntilukuihin eri julkisivujen parvekkeiden kesken on esitetty kuvassa 16.



**KUVA 15. Rakennuksen E-luku parvekelasin ST-arvon funktiona eri julkisivuilla**



**KUVA 16. Eri tilojen asetuntiluvut parvekelasin ST-arvon funktiona eri julkisivuilla**

Edellä olevat tulokset kuvaavat tilannetta, jossa parvekelasien pinta-alat vaihtelevat eri julkisivujen kesken. Tulokset ovat luotettavia vain kerrostalorakennuksille, joiden ikkunapinta-alat eri julkisivujen kesken jakautuvat samalla tavalla kuin simuloinneissa käytetyn perusmallin ikkunapinta-alat ja niitä on varjostettu samalla tavalla kuin tässä työssä käytettyä perusmallia.

Tämän takia tulisi tutkia tilannetta, jossa eri julkisivujen ikkunapinta-alat ovat samat. Tällöin saataisiin selville, minkä julkisivun parvekelasituksilla on eniten vaikutusta sellaisen rakennuksen E-lukuun, jossa on saman verran parvekelasipinta-alaa ja ikkunapinta-alaa, joita parvekelasit varjostavat. Tämän työn tulokset voidaan normittaa ilmansuunnittain samalle ikkunapinta-alalle, mutta luotettavien tulosten saamiseksi tulisi tutkia rakennusta, jossa olisi lähtötilanteessa saman verran ikkunapinta-alaa eri julkisivujen kesken. Koska auringon lämpösäteily kohdistuu eniten etelän ja lännen puoleisille julkisivuille, on oletettavaa, että näiden julkisivujen parvekelasituksilla on suurimmat vaikutukset paitsi rakennuksen E-lukuun, myös tilojen asetuntilukuihin.

#### 4.4 Rakennuksen vaipan ilmatiiviys

Rakennuksen ilmatiivis rakentaminen ehkäisee ei-toivottuja ilmavuotoja rakennuksen vaipan lävitse, alentaa lämmitysenergian määrää ja näin ollen parantaa E-lukua. Toi-

saalta suuri vuotoilmavirta ehkäisee rakennuksen yllämpenemistä, koska yllämpö virtaa epätiiviyyskohdista ulos rakennuksesta. Epätiivis rakentaminen ei kuitenkaan ole energiatehokkuussyistä ja tilojen talvisaikaisista lämpö-olosuhteista johtuen suotavaa.

Vaipan ilmatiiviyttä voidaan parantaa konkreettisesti minimoimalla rakennuksen vaippaan tehtävät reiät ja aukot. Tämä tarkoittaa käytännössä asentamalla putket, kanavat ja sähköjohdot rakennuksen vaipan sisäpuolelle. Tarvittavat läpiviennit tulee eristää huolellisesti. Puurakenteisten rakennusten ilmasulku tulee olla yhtenäinen, sen saumat tulee limittää tarpeeksi ja tiivistää huolellisesti. Rakenneosien ja esimerkiksi elementtien liitoskohdat tulee myös tiivistää huolellisesti. Betonielementtien liitoskohdissa tulee käyttää liitosvalua. Jos rakennuksessa on tiiliverhous ja puurunko voidaan ilmanpitävyyttä parantaa tiiliverhouksen sisärappauksella. [3.]

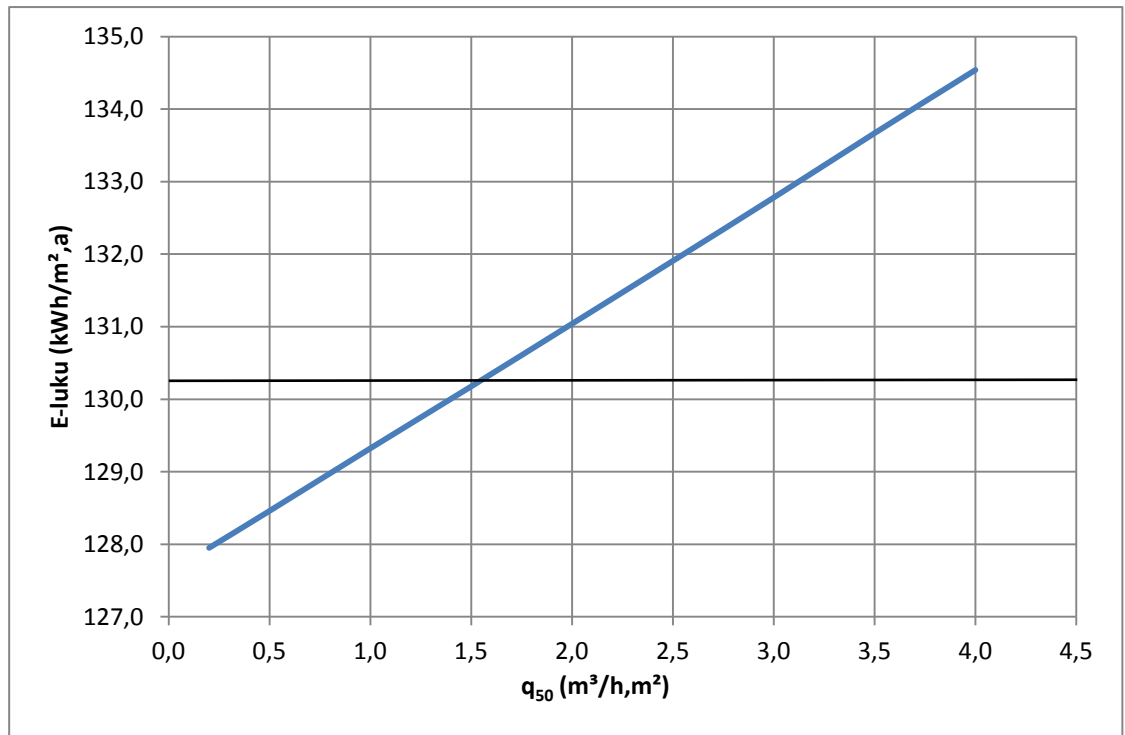
Jos rakennusta rakennetaan talviaikaan, on hyvä keino tarkistaa rakenteiden liitokset ja muut epätiiviyyskohdat lämpökamerakuvausella rakennusvaiheessa, jolloin asiaan voidaan vielä puuttua. Tiivis rakennuksen vaippa mahdollistaa tulo- ja poistoilmavirran suhteen  $R_{LTO}$  kasvattamisen, jolloin myös lämmöntalteenoton tehokkuus kasvaa. [3.]

Rakennuksen ilmatiiviyttä mitataan painekokein, joko rakennuksen oman ilmanvaihdon avulla tai erillisellä puhaltimella. Kokeessa rakennukseen tuotetaan puhaltimella 50 Pa paine-ero vaipan lävitse ja mitataan vuotoilmavirta. Tämän perusteella saadaan määritettyä rakennuksen ilmanvuotoluku  $q_{50}$ , joka saa E-lukulaskennassa olla korkeintaan  $4 \text{ m}^3/(\text{h}, \text{m}^2)$  [1]. Arvoa  $4 \text{ m}^3/(\text{h}, \text{m}^2)$  tulee käyttää E-lukulaskennassa myös jos rakennuksen ilmatiiviyttä ei osoiteta tiiveysmittauksin [1]. Tasauslaskennassa ilmanvuotolukuna käytetään arvoa  $2 \text{ m}^3/(\text{h}, \text{m}^2)$  [1]. Tässä insinöörityössä perusmallin ilmanvuotolukuna on käytetty taulukon 2 mukaisesti arvoa  $1,5 \text{ m}^3/(\text{h}, \text{m}^2)$ . Ilmanvuotoluku  $q_{50}$  on ilmoitettu tilavuusvirtana rakennuksen vaipan pinta-alaa kohti.

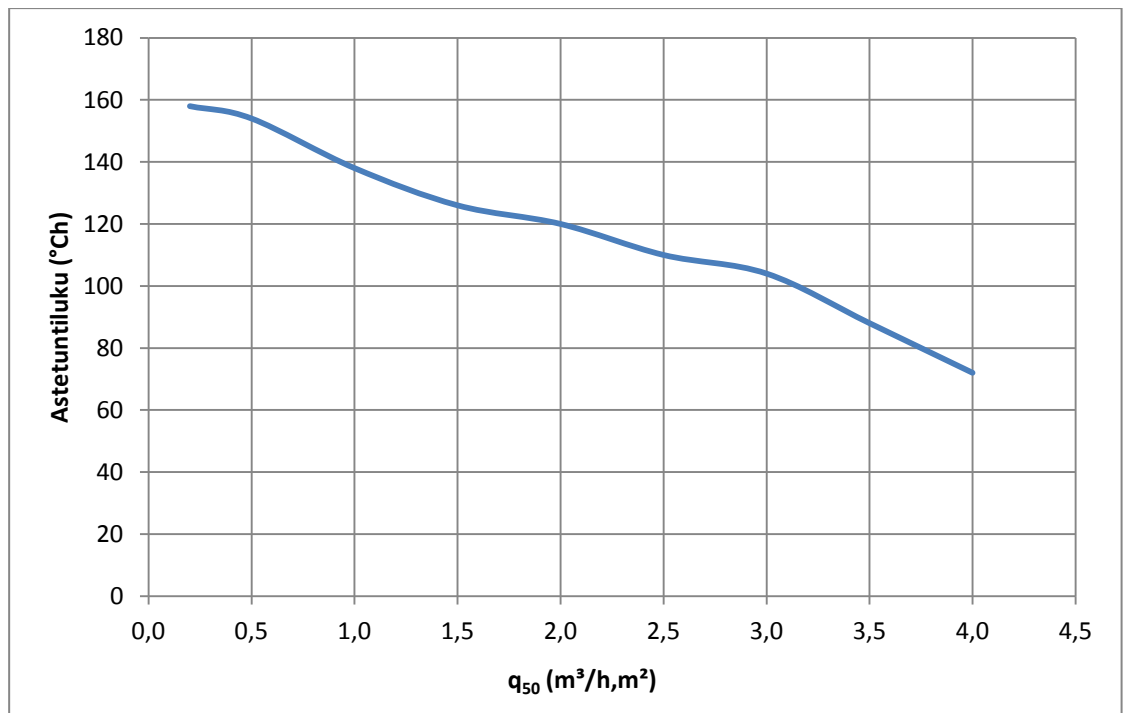
Tässä opinnäytetyössä tutkittiin rakennuksen ilmanvuotoluvun,  $q_{50}$  vaikutusta rakennuksen E-lukuun. Yllämpenemisen tutkimiseksi riittää tätä tekijää tutkittaessa yksi tila, koska vuotoilmavirta on sama kaikilla rakennuksen julkisivuilla. On kuitenkin huomattava, että ilmanvuotoluvun muutoksella on suuremmat vaikutukset sellaisen tilan astetuntilukuun, jonka ulkoseinän pinta-ala on suurempi kuin toisen tilan, jonka ulkoseinän pinta-ala on pienempi.



Kuvassa 17 on esitetty rakennuksen E-luku ilmavuotoluvun,  $q_{50}$  funktiona. Kuvassa 18 on esitetty tilan 418 astetuntiluku ilmavuotoluvun,  $q_{50}$  funktiona. Tarkat simulointien tulokset on esitetty liitteessä 7.



**KUVA 17. Rakennuksen E-luku ilmanvuotoluvun,  $q_{50}$  funktiona**



**KUVA 18. Tilan 418 astetuntiluku ilmanvuotoluvun,  $q_{50}$  funktiona**

#### 4.5 Ilmanvaihdon puhaltimien ominaissähköteho

Puhaltimen ominaissähköteho (SFP) kertoo, kuinka paljon puhallin tarvitsee tehoa kilowatteina yhden ilmakeuutiometrin siirtämiseksi sekunnin aikana. Pienemmällä SFP-luvulla puhallin tarvitsee vähemmän tehoa ja näin ollen myös vähemmän energiaa ilmakeuution siirtämiseksi. Ilmanvaihtokoneen SFP-luvulle (poisto- ja tuloilmapuhaltimelle) on asetettu rajaksi  $2,0 \text{ kW}/(\text{m}^3/\text{s})$ , pelkälle poistoilmapuhaltimelle raja on  $1,0 \text{ kW}/(\text{m}^3/\text{s})$  [1]. Suomen rakennusmääräyskokoelman osassa D3 on esitetty määräykset, joiden perusteella edellä mainituista E-lukulaskennan suurimmista sallituista arvoista voidaan poiketa [1].

Puhaltimen ominaissähkötehoa ja täten energiankulutusta voidaan alentaa mitoittamalla ilmanvaihtokanavat väljiksi (isoiksi) ja valitsemalla otsapinta-alaltaan tarpeeksi suuri ilmanvaihtokone (jolloin ilmanvirtausnopeus ja painehäviöt koneessa laskevat). Puhaltimissa tulisi käyttää tasavirtamoottoreita aina kun mahdollista, jolloin puhaltimen energiankulutus voidaan jopa puolittaa. Nykyään pienet puhaltimet varustetaan yleisesti tasavirtamoottoreilla. Jos tasavirtamoottorilla varustettuja puhaltimia ei ole saatavilla, tulee käyttää vaihtovirtamoottorilla varustettuja puhaltimia, joissa on taajuusmuuttaja. Järjestelmään tulee valita sellainen puhallin, jonka kokonaishyötysuhde on korkein, sekä moottorin ottoteho pienin puhaltimen toimintapisteessä. [13.]

Rajoittaviksi tekijöiksi puhaltimen ominaissähkötehon kohdalla nousevat yleensä ilmanvaihtokoneiden koko (koska suuri ilmanvaihtokone tarvitsee myös suuren tilantarpeen), kanaville varattu rajallinen asennustila, sekä suurempien kanavien ja koneiden korkeampi hinta.

Tässä insinööriyössä on tutkittu puhaltimien SFP-luvun vaikutusta rakennuksen E-lukuun. Puhaltimen SFP-luvun muutokset eivät vaikuta tilojen ylälämpenemiseen, vaan astetuntiluku pysyy vakiona kaikilla SFP-luvuilla.

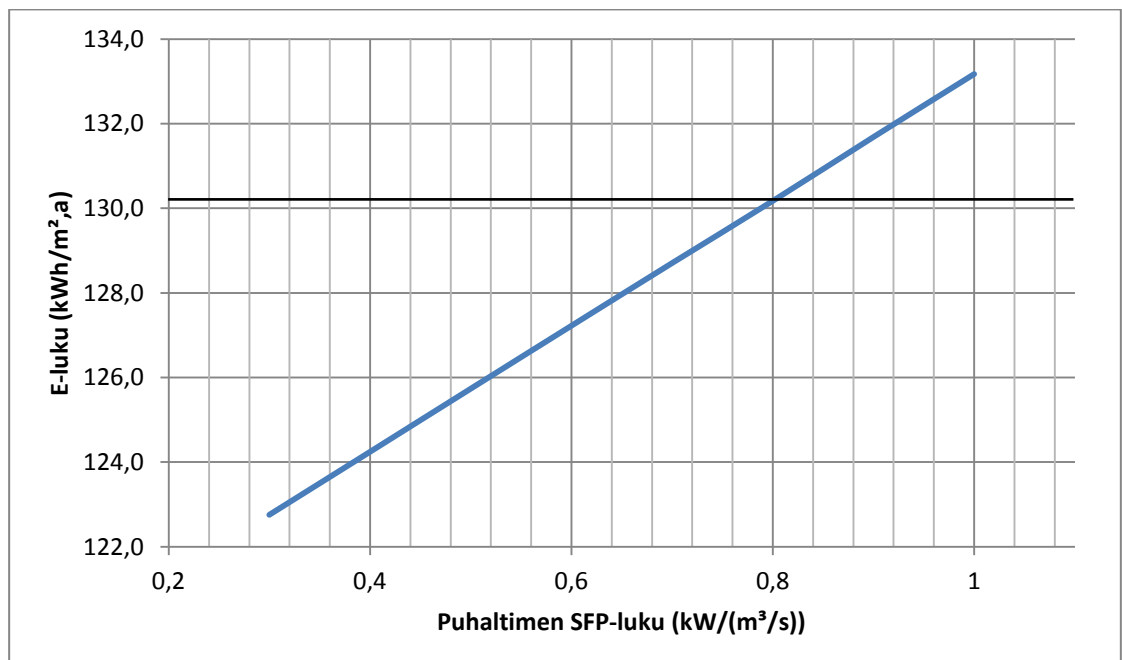
RIUSKA-simulointiohjelmassa voidaan kullekin ilmanvaihtokoneen puhaltimelle syöttää paineenkorotus  $\Delta p_{\text{puh}}$  ja kokonaishyötysuhde  $\eta_{\text{puh,kok}}$ . Yhdistämällä yhtälöt (3) ja (4) voidaan yhden puhaltimen ominaissähköteho SFP laskea yhtälöstä (5). [13.]

$$\phi_{puh} = \frac{\Delta p_{puh} * q_{v,puh}}{\eta_{puh,kok}} \quad (3)$$

$$SFP = \frac{\phi_{puh}}{q_{v,puh} * 1000} \quad (4)$$

$$SFP = \frac{\Delta p_{puh}}{\eta_{puh,kok} * 1000} \quad (5)$$

Simulointeja tehtäessä määritettiin jokaisen puhaltimen paineenkorotus,  $\Delta p_{puh}$  ja kokonaishyötysuhde,  $\eta_{puh,kok}$  siten, että puhaltimien SFP-luku vaihteli välillä 0,3 kW/(m<sup>3</sup>/s) - 1,0 kW/(m<sup>3</sup>/s). Simuloinneissa kaikkien puhaltimien keskinäinen ominaissähköteho pidettiin samana ja täten muutettiin kaikkien puhaltimien ominaissähkötehoja kerralla. Todellisuudessa jokaisella rakennuksen puhaltimella voi olla eri SFP-luku, erilaisia variaatioita on lukuisia. Tällöin sellaisen puhaltimen ominaissähkötehon muutoksella on suurin vaikutus E-lukuun, jonka ilmavirta (E-lukulaskennassa palvelualue) on suurin. Perusmallin E-luku puhaltimien ominaissähkötehosta riippuvaisena on esitetty kuvassa 19. Tarkat puhaltimien ominaissähkötehoa koskevat simulointien tulokset on esitetty liitteessä 8.



**KUVA 19. Rakennuksen E-luku yhden puhaltimen SFP-luvun funktiona (ilmavaihdon puhaltimien SFP-luku on simuloinneissa pidetty kaikkien puhaltimien kesken vakiona)**

#### 4.6 Ilmanvaihdon lämmöntalteenotto

Suomen rakennusmääräyskokoelman osassa D3 on määrätty ilmanvaihdon poistoilman lämmöntalteenotosta seuraavasti:

"2.6.2 Rakennuksen ilmanvaihdon poistoilmasta on otettava lämpöä talteen lämpömäärä, joka vastaa vähintään 45 % ilmanvaihdon lämmityksen tarvitsemasta lämpömäärästä. Vastaava lämpöenergiantarpeen pienentäminen voidaan toteuttaa

- 1) rakennuksen vaipan lämmöneristystä parantamalla;
- 2) rakennuksen vaipan ilmanpitävyyttä parantamalla; tai
- 3) vähentämällä ilmanvaihdon lämmityksen tarvitsemää lämpömäärää muulla tavalla kuin poistoilman lämmöntalteenotolla." [1.]

Tämä 45 % lämpömäärä tarkoittaa 45 % osuutta koko rakennuksen ilmanvaihdon lämmitysenergiasta, jolloin osuutta voidaan kuvata termillä  $\eta_{a,iv}$ . Ilmanvaihtokonevalmistajat ilmoittavat yleensä standardin EN 308:1997 mukaisesti lasketun tuloilman lämpötilasuhteen  $\eta_{t,EN308:1997}$ , joka kuvaa, kuinka paljon ilmanvaihdon lämmöntalteenottolaite voi ottaa poistoilmasta lämpöä talteen kyseisen standardin määrittämällä lähtötiedoilla laskettuna. Valmistajat voivat ilmoittaa myös mitoitusulkolämpötilalla lasketun tuloilmasuhteen  $\eta_{t,mit}$  joka kuvaa, kuinka paljon poistoilmasta saadaan lämpöä talteen mitoitusulkolämpötilalla. E-lukulaskennassa voidaan käyttää Suomen rakennusmääräyskokoelman osan D5 mukaisia arvoja ilmanvaihtokoneiden tuloilman lämpötilasuhteille  $\eta_t$ , jos ilmanvaihtokone valmistajan ilmoittamia varmistettuja suorituservoja ei ole käytettävissä [9].

Internetissä on saatavana laskentataulukkoja, joiden avulla ilmanvaihtokoneen poistoilmanvaihdon lämmöntalteenoton vuosihyötysuhde  $\eta_{a,ivkone}$ , koko rakennuksen poistoilman lämmöntalteenoton vuosihyötysuhde  $\eta_{a,iv}$  ja yksittäisen ilmanvaihtokoneen tuloilman lämpötilasuhte  $\eta_t$  voidaan laskea, kun tiedetään ilmanvaihtokoneiden mitoitusarvot. Yksi laskentataulukko on saatavilla ympäristöministeriön verkkosivuilta [14].

Ilmanvaihdon lämmöntalteenoton tehokkuuteen voidaan vaikuttaa lämmönsiirtimen tyypillä, suunnittelemalla tulo- ja poistoilmavirrat mahdollisemman samansuuruisiksi sekä valitsemalla tarpeeksi suurikokoinen lämmöntalteenottolaite (jolloin ilman vir-

tausnopeus laitteessa laskee ja tehokkuus paranee). Virtauksen tulee kuitenkin olla turbulenttinen lämmöntalteenottolaitteen siirrinpinnoilla, lämmöntalteenoton tehokkuuden takaamiseksi. Yleensä ilmavirran turbulenttisuus toteutuu ilmanlämmöntalteenottolaitteen kohdalla.

Tässä opinnäytetyössä tutkitaan ilmanvaihdon lämmöntalteenoton tehokkuutta mitoitusulkolämpötilalla lasketun tuloilman lämpötilasuhteen  $\eta_{t,mit}$  avulla, joka voidaan syöttää RIUSKA-simulointiohjelmaan. Ilmanvaihtokoneen tuloilman lämpötilasuhte mitoitusulkolämpötilassa  $\eta_{t,mit}$  voidaan laskea kaavasta 6 [15].

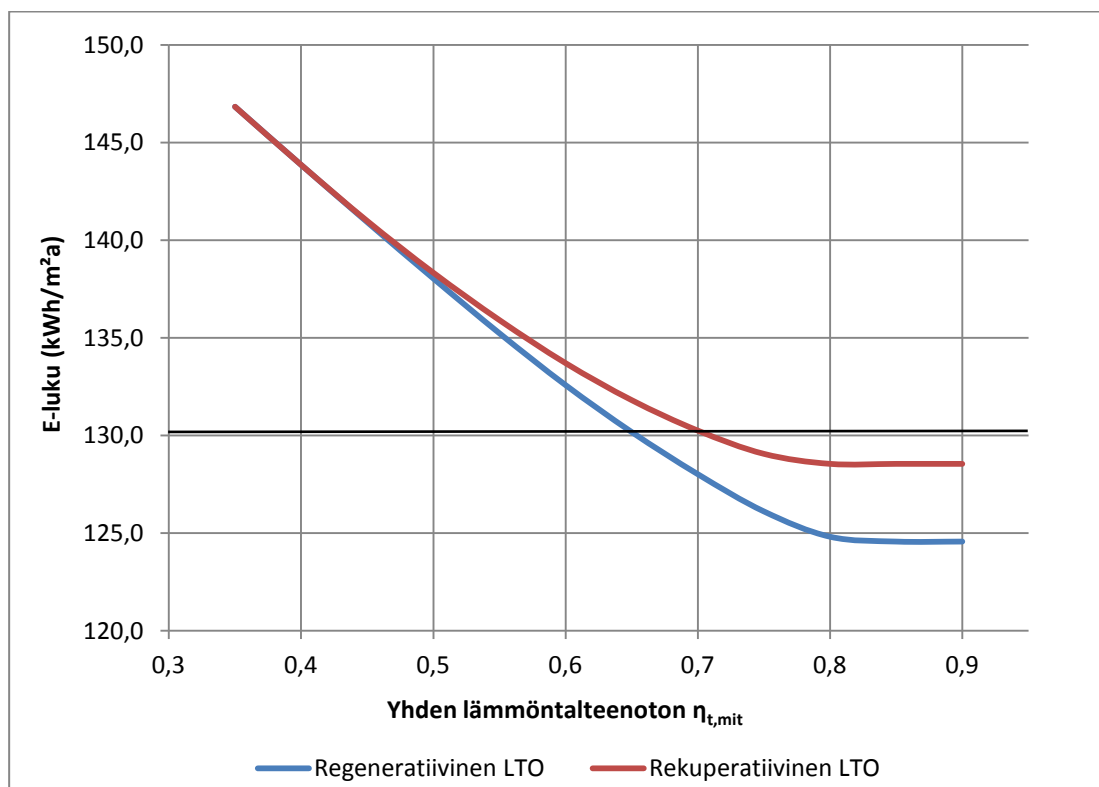
$$\eta_{t,mit} = \frac{t_{t,LTO} - t_{u,mit}}{t_s - t_{u,mit}} \quad (6)$$

E-lukulaskennassa tulee lisäksi käyttää ilmanvaihtokonevalmistajan ilmoittamaa varmennettua suoritustarvoa alimmalle sallitulle jäteilman lämpötilalle  $t_{j,min}$ , lämmöntalteenottolaitteen jäätyamisen estämiseksi. Jos varmennettuja arvoja ei ole olemassa, voidaan asuinrakennuksissa levylämmönsiirtimelle käyttää jäteilman alimpana lämpötilana arvoa +5 °C ja pyöriville tai kosteutta siirtäville levylämmönsiirtimille arvoa 0 °C. Tässä insinöörityössä on käytetty edellä mainittuja, Suomen rakennusmääräyskoelman osan D5 [9] mukaisia arvoja.

Ennen regeneratiivisella lämmöntalteenotolla päästiin rekuperatiivista parempiin lämmöntalteenoton hyötysuhteisiin, mutta laitteiden kehittymisen myötä levylämmönsiirtimen ja pyörivän lämmönsiirtimen lämpötilasuhteilla ei ole juurikaan eroa. Ainoastaan nestekiertoisissa lämmönsiirtimissä lämpötilasuhte on kahta edellämainittua alhaisempi. [2; 3.]

Tässä insinöörityössä lämmöntalteenoton tehokkuutta tutkittaessa ilmanvaihdon lämmöntalteenottolaitteiden mitoitusulkolämpötilalla laskettu tuloilman lämpötilasuhte  $\eta_{t,mit}$  pidettiin rakennuksen kaikkien ilmanvaihdon lämmöntalteenottolaitteiden kesken vakiona ja täten muutettiin kaikkien lämmöntalteenottolaitteiden tuloilman lämpötilasuhdetta kerralla. Koska työtä tehtäessä ei ollut käytössä ilmanvaihtosuunnitelmia, käytettiin tulo- ja poistoilmavirran välisenä suhteenä  $R_{LTO}$  arvoa 1,0. Yleensä rakennuksen poistoilmavirta on tuloilmavirtaa hieman suurempi, jolloin  $R_{LTO}$  on luokkaa 0,90 - 0,95.

Kuvassa 20 on esitetty rakennuksen E-luku mitoitusulkolämpötilalla lasketun ilmanvaihtokoneen tuloilman lämpötilasuhteen  $\eta_{t,mit}$  funktiona. Lämmöntalteenoton hyötysuhde ei vaikuta rakennuksen tilojen ylilämpenemiseen, vaan astetuntiluku pysyy kaikilla lämpötilasuhteen arvoilla vakiona. Tarkat lämmöntalteenoton hyötysuhdetta koskevat simulointien tulokset on esitetty liitteessä 9.



**KUVA 20. Rakennuksen E-luku mitoitusulkolämpötilalla lasketun ilmanvaihtokoneiden tuloilman lämpötilasuhteen,  $\eta_{t,mit}$  funktiona ( $\eta_{t,mit}$  on simuloinneissa pidetty kaikkien lämmöntalteenottolaitteiden kesken vakiona)**

Kuvassa 20 esitettyjen käyrien erot johtuvat lämmöntalteenottolaitteiden varmennetuista alhaisimmista toimintalämpötiloista. Jos jäätymisenestolämpötila olisi ollut regeneratiivisella- ja rekuperatiivisellalämmöntalteenotolla sama, olisivat käyrät olleet päällekkäin.

Rakennusta suunniteltaessa pitää selvittää, voidaanko regeneratiivista lämmöntalteenottoa käyttää koko rakennuksen keskitetyssä ilmanvaihtojärjestelmässä. Suomen rakennusmääräyskokoelman osan D2 [10, s.17] mukaan regeneratiivista lämmönsiirintä voidaan käyttää koko rakennuksen keskitetyssä ilmanvaihtojärjestelmässä, kun kanavistoon johdetaan korkeintaan 5 % luokan 3 poistoilmaa eikä lainkaan luokan 4 poistoilmaa. Luokan 3 poistoilma käsittää asuinkerrostalon WC-tiloista, pesuhuoneis-

ta, saunoista ja asuinhuoneistojen keittiöistä poistettavan ilman. Kun ilmanvaihtokone palvelee vain yhden perheen asuntoa tai yksittäistä tilaa voidaan kuitenkin käyttää vapaasti regeneratiivista lämmönsiirrintä. [10.]

Rekuperatiivisille lämmönsiirtimille ei ole asetettu edellä mainittua viiden prosentin sääntöä, vaan sitä käytettäessä voidaan luokan 3 poistoilmaa johtaa rakennuksen keskitettyyn ilmanvaihtojärjestelmään vapaasti. Molempien lämmönsiirrintyyppien kohdalla on ilmanvaihdon painesuhteet suunniteltava asuinkerrostalossa siten, että ilmvirran virtaussuunta on tuloilmapuolelta poistoilmapuolelle. [10.]

#### 4.7 Ilmanjakotapa

Tässä luvussa vertaillaan hajautetun- ja keskitetyn ilmanvaihtojärjestelmätyypin eroja E-lukulaskennan kannalta. Molempien järjestelmien energiatehokkuus riippuu keskeisesti laitteistojen mitoituksista. Molempiin järjestelmiin vaikuttavat olennaisesti puhaltimien ominaissähkötehot ja lämmöntalteenottolaitteiden hyötysuhteet. Tässä työssä eri järjestelmiä vertailtaessa kaikkien ilmanvaihtokoneiden lämmöntalteenottolaitteiden hyötysuhteet ja puhaltimien ominaissähkötehot hajautetun- ja keskitetyn ilmanvaihtojärjestelmän välillä pidettiin samana ( $\eta_{t,mit} = 0,65$  ja  $SFP = 0,8 \text{ kW}/(\text{m}^3/\text{s})$ ).

Eri järjestelmille ovat kuitenkin tyypillisiä erilaiset seikat ja laskennassa huomioitavat asiat, joita tässä luvussa on käsitelty. Perusmalli, joka toimii tämän insinööritoimiston pohjana, on mallinnettu keskitetyllä ilmanvaihdolla, joka sisältää kolme ilmanvaihtokonetta sijoitettuna ilmanvaihtokonehuoneisiin neljännen kerroksen yläpuolelle. Hajautettua ilmanvaihtojärjestelmää tutkittaessa perusmalliin tuotiin yhteensä 64 ilmanvaihtokonetta, joiden palvelualueet jaettiin siten, että jokaisella asunnolla on oma ilmanvaihtokoneensa. Lisäksi jokaisella porrashuoneella on oma ilmanvaihtokoneensa ja kerrostalon yleiset tilat, kuten varastot ja pesutilat, on jaettu pienempiin kokonaisuuksiin omine ilmanvaihtokoneineen.

Tässä insinöörityössä tutkitut erilaiset ilmanvaihtojärjestelmien ratkaisut olivat:

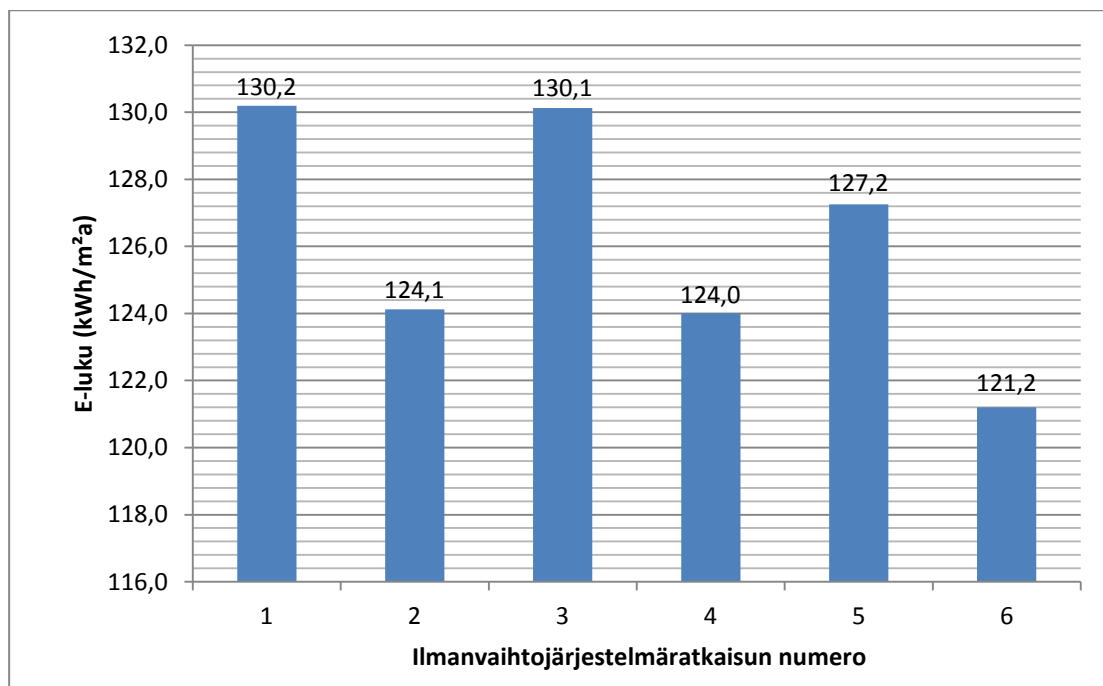
1. Perusmallin mukainen keskitetty ilmanvaihtojärjestelmä
2. Keskitetty ilmanvaihtojärjestelmä + huoneistokohtainen ilmanvaihdon ohjaus
3. Hajautettu ilmanvaihtojärjestelmä
4. Hajautettu ilmanvaihtojärjestelmä + huoneistokohtainen ilmanvaihdon ohjaus
5. Hajautettu ilmanvaihtojärjestelmä + ilmanvaihtokonehuoneiden poisto rakennuksesta
6. Hajautettu ilmanvaihtojärjestelmä + huoneistokohtainen ilmanvaihdon ohjaus + ilmanvaihtokonehuoneiden poisto rakennuksesta.

Ilmanvaihtokoneiden määrällä ei ole vaikutusta rakennuksen E-lukuun, jos ilmanvaihdon puhaltimien ominaissähkötehot ja lämmöntalteenottolaitteiden hyötysuhteet ovat samat. Huoneistokohtaista ilmanvaihdon ohjausta käytettäessä ilmanvaihdon ominais-  
tuloilmavirta  $q_{v,omin}$  voidaan E-lukulaskennassa alentaa standardikäytön arvosta  $0,5 \text{ dm}^3/\text{s}, \text{m}^2$  arvoon  $0,4 \text{ dm}^3/\text{s}, \text{m}^2$  [1, s.18]. Hajautettua ilmanvaihtoa käytettäessä erillisistä ilmanvaihdon konehuoneista voidaan yleensä luopua, jolloin simuloitavan rakennuksen pinta-ala pienenee. Tämän seurauksena pienenee tilojen lämmitysenergian, ilmanvaihdon lämmitysenergian, käyttöveden lämmitysenergian, puhaltimien sähköenergian, kuluttajalaitteiden sähköenergian ja valaistuksen sähköenergian kulutus, koska nämä kaikki ovat E-lukulaskennassa riippuvaisia simuloitavan rakennuksen lämmitetystä nettopinta-alasta.

Tilojen ylilämpenemistä tarkasteltaessa ilmanvaihdon järjestelmätyypillä ei yleensä ole vaikutusta tilojen astetuntilukuihin. Simuloinneissa numero 5 ja 6 tilan 418 astetuntiluku on kuitenkin kasvanut. Tämä johtuu siitä, että ilmanvaihtokonehuone on ollut osittain sijoitettuna tilan 418 päälle. Täten ilmanvaihtokonehuoneiden poisto aiheuttaa tilaan suuremman lämpökuorman, koska koko yläpohja altistuu auringon lämpösäteilylle ja kesäaikaan lämpimälle ulkoilmalle. Ilmanvaihtokonehuoneiden poisto vaikuttaa kuitenkin vain sellaisen tilan astetuntilukuun, jolla on yhteinen rakennosa ilmanvaihtokonehuoneen kanssa.

Ilmanvaihdon järjestelmätyyppejä koskevat simulointien tulokset on esitetty kuvassa 21. Tarkat simulointien tulokset on esitetty liitteessä 10.





**KUVA 21. Rakennuksen E-luku eri ilmanvaihtojärjestelmäratkaisuilla. Ilmanvaihtojärjestelmäratkaisut numeroineen on esitetty aiemmin tässä luvussa**

Myöskään hajautetun ja keskitetyn ilmanvaihtojärjestelmän eroja tutkittaessa ei otettu huomioon, voidaanko järjestelmät toteuttaa käytännössä. Luvussa 4.6 käsiteltiin lämmöntalteenottotyypin valintaa ja siihen kohdistuvia rajoituksia, ja luvussa 4.5 ilmanvaihdon puhaltimia ja niitä koskevia rajoituksia. Ilmanvaihdon puhaltimet ja lämmöntalteenottolaitteet ovat osa hajautettua sekä keskitettyä ilmanvaihtojärjestelmää.

Hajautetun ilmanvaihtojärjestelmän käyttöä rajoittavat muun muassa parvekkeet. Suomen rakennusmääräyskokoelman osan D2 mukaan ulkoilmalaitteet on sijoitettava mahdollisten parvekelasien ulkopuolelle. Lisäksi ulkoilma- ja jäteilmalaitteita ei saa asentaa rakennuksen parvekkeille. Myös muut jäteilma- ja tuloilmalaitteiden sijoitusta koskevat määräykset voivat rajoittaa järjestelmätyypin valintaa. Nämä seikat voivat edellyttää pitkiä ja vaikeita kanavointeja, jolloin hajautetusta ilmanvaihtojärjestelmästä joudutaan mahdollisesti luopumaan kohoavan SFP-luvun ja tilanpuutteen vuoksi. [10.]

#### 4.8 Aurinkoenergian hyödyntäminen

Kuten luvussa 2 on kerrottu, tulevaisuudessa on odotettavissa määräyksiä uusiutuvan energian käytöstä rakennuksissa. Nähtäväksi jää, miten uusissa määräyksissä otetaan huomioon esimerkiksi eri tavoilla tuotettu, rakennukseen ostettava kaukolämpö- tai

sähköenergia. Eri tavoilla tuotetun energian ostamisen lisäksi on mahdollista tuottaa uusiutuvaa energiaa rakennuksen omalla tontilla ja vaikuttaa siten E-lukuun. Energiaa voidaan tuottaa (siirtää ympäristöstä järjestelmiin) rakennuksen omalla tontilla muun muossa aurinkopaneelien ja -keräimien avulla. Aurinkokeräimet siirtävät auringosta saatavan säteilyenergian lämpöenergiaksi ja -paneelit auringosta saatavan säteilyenergian sähköenergiaksi.

Yleinen aurinkokeräimillä tuotetun lämpöenergian käyttökohde on lämmin käyttövesi. Käyttökohde on hyvä, koska lämpimän käyttöveden tarve pysyy likimain samana ympäri vuoden. Tilojen tai ilmanvaihdon lämmitykseen aurinkokeräimillä ei sen sijaan saavuteta yhtä merkittävää hyötyä, koska lämmityskauden aikana, jolloin energiaa tarvittaisiin, aurinko paistaa Suomessa matalalta ja heikosti, eikä sitä voida paljoa hyödyntää. Aurinkolämmön käyttäminen tilojen lämmitykseen on kuitenkin taloteknisesti mahdollista. Aurinkopaneeleita voidaan käyttää pienentämään rakennuksen ostosähköenergiantarvetta, joka E-lukulaskennassa on jaettu järjestelmien sähköenergiaan, puhaltimien sähköenergiaan, valaisimien sähköenergiaan, ja kuluttajalaitteiden sähköenergiaan.

Aurinkokeräimillä ja -paneeleilla saavutettava energian tuotto riippuu laitteiston mitoituksesta, johon vaikuttaa olennaisesti aurinkokeräimien ja -paneelien pinta-ala, suuntaus ja varjostus [9]. Aurinkokeräimiä tai -paneeleita voidaan sijoittaa esimerkiksi rakennuksien katoille tai kuvan 22 mukaisesti rakennusten julkisivuille, jolloin paneelit ja keräimet toimivat myös rakennuksen varjostuksena [2]. Lisäksi keräimiä ja paneeleita voidaan asentaa rakennuksen ulkopuolelle. Aurinkokeräimien ja paneelien sijoittaminen etelä- ja länsijulkisivuille on tehokkainta, koska aurinkoenergia kohdistuu eniten näille kahdelle julkisivulle [9].



**KUVA 22. Aurinkopaneelit asennettuna rakennuksen kaksoisjulkisivulle. Kuva on otettu Helsingissä sijaitsevasta Viikin ympäristötalosta [2]**

Aurinkopaneeleilla auringon säteilyenergiasta voidaan muuttaa sähköksi n. 15 % ja aurinkokeräimillä lämpöenergiaksi noin 25 - 35 %. Yhden neliömetrin aurinkokeräin tuottaa 250 - 400 kWh vuodessa, kun taas aurinkopaneelista saadaan neliötä kohti noin 120 kWh vuodessa. [16.]

Aurinkokeräimien energian tuoton enimmäismääränä voidaan kuitenkin pitää 40 - 60 % osuutta vuotuisesta käyttöveden lämmityksen energiantarpeesta, koska talvella saatava aurinkoenergian määrä on vain murto-osa auringon kokonaissäteilyenergiasta, jolloin loppu lämpöenergia joudutaan ostamaan rakennukseen [3]. Tällöin ei enää ole juurikaan vaikutusta aurinkokeräimien pinta-alan lisäämisellä tai muulla järjestelmän mitoituksella. Aurinkopaneelien kohdalla tilanne on vastaava.

Aurinkopaneeleilla ja -keräimillä voidaan kuitenkin kesällä tuottaa energiaa yli rakennuksen tarpeiden. Toistaiseksi ei kuitenkaan ole keksitty järkevää ratkaisua millä energiaa voitaisiin varastoida, kunnes energiantarvetta taas olisi. Isompia järjestelmä-

kokonaisuuksia luotaessa rajoittavaksi tekijäksi muodostuvat myös tilanpuute ja esteettiset tekijät.

Käytännössä aurinkopaneeleista saatavan sähköenergian hyödyntäminen on helppoa sellaisissa laitteissa, jotka on kytketty samaan ryhmään. Rakennuksien valaisimet ja pistorasiat kytketään monesti samaan ryhmään, jolloin aurinkopaneelien sähköä ei voida jakaa vain toiselle edellä mainituista. Toinen helposti toteutettava ratkaisu on tuottaa sähköenergiaa kiinteistön LVI-laitteiden tarpeisiin, koska nämä ovat yleensä kytketty samaan ryhmään. Aurinkopaneelien kytkeminen koko rakennuksen sähköverkkoon on myös helppoa.

Aurinkopaneelilla tuotettua sähköenergiaa voitaisiin lisäksi helposti hyödyntää jäähdytysjärjestelmän ostosähköenergian pienentämiseen, jos rakennuksessa olisi jäähdytysjärjestelmä. Tämä on varsin hyvä käyttökohde, koska jäähdytystä tarvitaan enemmän kesäaikaan, jolloin myös auringosta voidaan saada energiaa paneelien välityksellä. Lisäksi jäähdytysjärjestelmä voi olla kytkettynä omaan sähköryhmään tai se voi olla osa kiinteistön LVI-laitteiden ryhmää.

Tässä opinnäytetyössä tutkittiin käyttöveden lämmittämistä aurinkokeräimillä sekä kuluttajalaite-, valaistus- ja LVI-laitesähkön tuottamista aurinkopaneelilla, koska E-lukulaskenta on jaettu näihin osa-alueisiin. Tilannetta on lisäksi tarkasteltu jakamalla sähköä käyttävät laitteet kolmeen muuhun ryhmään, jotka ovat LVI-laitesähkö, kuluttajalaite- ja valaistussähkö (yhdessä) sekä koko rakennuksen kuluttama sähköenergia.

Aurinkokeräimiä käytettäessä on huomattava, että lämmitysjärjestelmän sähköenergian kulutus  $W_{\text{lämmitys}}$  nousee tarvittavan aurinkokeräinjärjestelmän kiertovesipumpun takia. Tällöin arvo tarvitsee laskea uudestaan ja korjata simulointiohjelmaan, koska RIUSKA ei osaa simuloida lämmitysjärjestelmän apulaitteiden sähköenergiankulutusta omatoimisesti. Pumpun vuodessa kuluttama energia,  $W_{\text{aurinko,pumput}}$  voidaan laskea kaavasta (7) [9, s. 49].

$$W_{\text{aurinko,pumput}} = \sum(\Phi_{\text{keräin,pumppu } i} \Delta T_{\text{keräin,pumppu } i}) / 1000 \quad (7)$$

Simulointeja tehtäessä on käytetty oletuksena, että aurinkokeräinjärjestelmässä on vain yksi pumppu, jonka ottoteho on 200W. Pumppu käy aina. Täten pumpun vuotuisen sähköenergiankulutus on kaavan (7) mukaisesti laskettuna

$$W_{aurinko,pumput} = (200W * 8760h)/1000 = 1752 \text{ kWh/a}$$

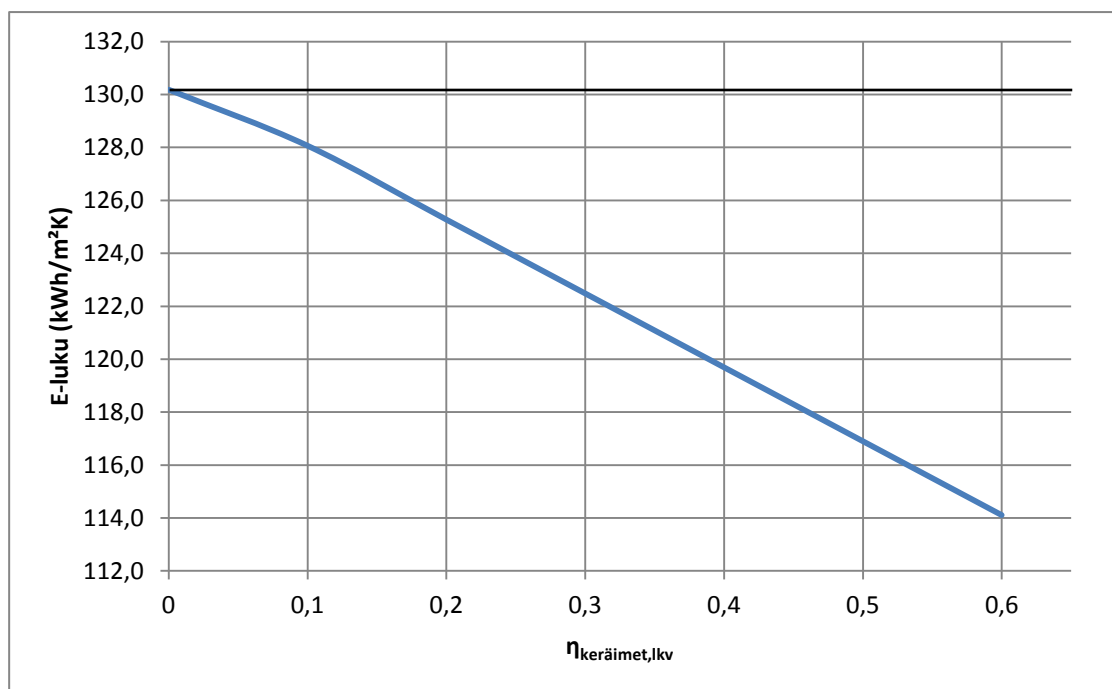
Aurinkokeräinjärjestelmän pumpun sähköenergiankulutus nostaa lämmitysjärjestelmän vuotuisen sähkön kulutuksen,  $W_{\text{lämmitys}}$  Suomen rakennusmääräyskokoelman osan D5 mukaisesti laskettuna arvoon 12 657,5 kWh/a [9, s.48]. Muiden lämmitysjärjestelmän osien sähkönkulutus on laskettu liitteessä 2.

Simuloinneissa käytetyn perusmallin vuotuinen nettoenergiantarve on esitetty kuvassa 4, josta nähdään, että suurin sähköenergiankuluttaja on kuluttajalaitteet, joka kattaa yli puolet rakennuksen vuotuisesta sähköenergiantarpeesta (93 MWh). Loput 47 % kattavat LVI-laitesähkö ja valaistussähkö liki yhtä suurilla osuuksilla (41 MWh ja 43 MWh). Käyttöveden lämmitysenergian kulutus on 45 % koko lämmitysenergian kulutuksesta, eli verrattain suuri. Täten on odotettavissa merkittävä parannus rakennuksen E-lukuun aurinkokeräimiä käytettäessä. Myös ostettavan sähköenergian määrän pienentämisellä aurinkopaneeleiden avulla on odotettavissa suuri vaikutus rakennuksen E-lukuun sähkön suuren energiamuotokertoimen vuoksi.

Suomen rakennusmääräyskokoelman osassa D5 [9] on esitetty laskentakaavat, joiden avulla aurinkopaneeleista saatava sähköenergia ja aurinkokeräimistä saatava käyttöveden lämmitysenergia saadaan otettua huomioon E-lukulaskennassa. Jos aurinkokeräimien lämpöenergian tuotto lasketaan Suomen rakennusmääräyskokoelman osan D5 [9] mukaisesti, on huomattava, että kyseistä laskentatapaa käytettäessä voidaan kattaa vain 40 % vuotuisesta käyttöveden lämmityksen energiantarpeesta. Aurinkopaneeleiden sähköenergian tuoton laskentaan ei Suomen rakennusmääräyskokoelman osan D5 luonnos [9] ole täydellinen, mutta voimaan tulevassa Rakennusmääräyskokoelman osassa D5 laskenta on oletettavasti esitetty kattavasti.

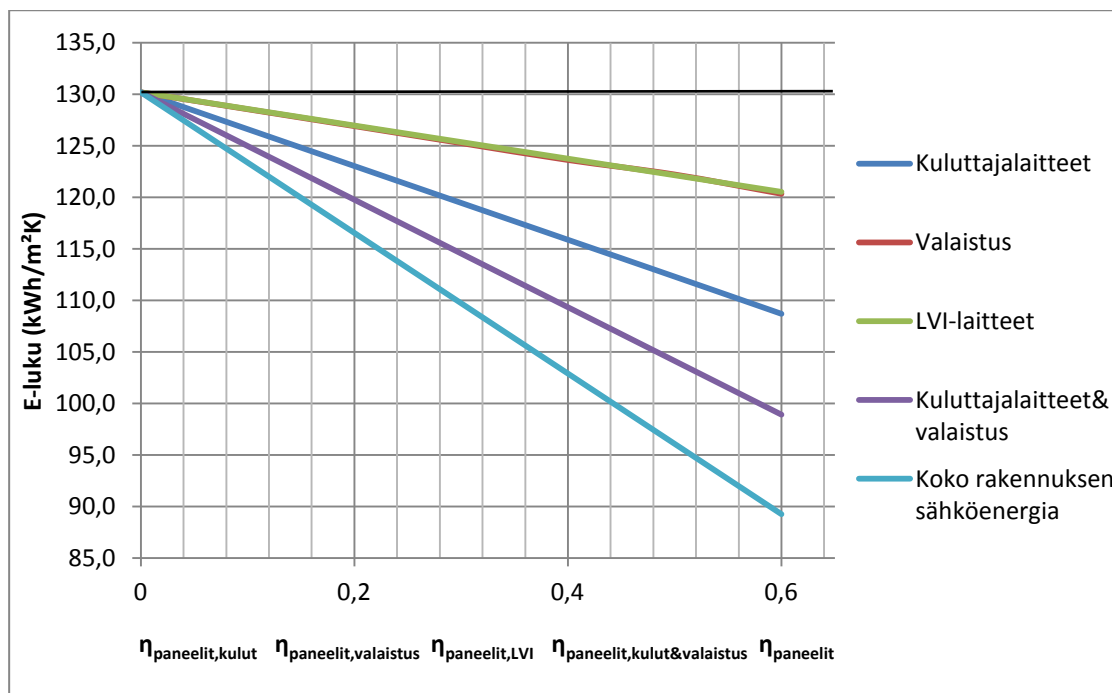
Kuvassa 23 on esitetty aurinkokeräimistä saatavan suhteellisen lämmitysenergian määrän vaikutus rakennuksen E-lukuun, kun energian käyttökohteena on käyttöveden lämmitys. Simuloinneissa käytetyssä perusmallissa ei ole käytetty aurinkokeräimiä, joten perusmallin tilanteessa aurinkokeräimistä saatavan energian suhde käyttöveden

lämmitysenergian tarpeeseen on  $\eta_{\text{keräimet,lkv}}$  on 0. Aurinkokeräinjärjestelmän käytöllä ei ole vaikutusta tilojen astetuntilukuihin, eikä siitä täten ole esitetty kuvaajaa. Tarkemmat aurinkokeräimien käyttöä koskevat simulointien tulokset on esitetty liitteessä 11.



**KUVA 23. Rakennuksen E-luku aurinkokeräimistä lämpimään käyttöveteen saatavan suhteellisen energiamäärän  $\eta_{\text{keräimet,lkv}}$  funktiona**

Kuvassa 24 on esitetty aurinkopaneeleista saatavan sähköenergian vaikutus rakennuksen E-lukuun eri käyttökohteilla. Tulokset ovat ilmoitettu riippuvaisina paneeleista saatavan vuotuisen sähköenergiansuhteena eri käyttökohteiden vuotuisen sähköenergian tarpeeseen. Simuloinneissa käytetyssä perusmallissa ei ole käytetty aurinkopaneeleita, joten vertailutilanteessa aurinkopaneeleista saatavan sähköenergian suhde eri käyttökohteiden sähköenergian tarpeeseen on 0. Myöskään aurinkopaneelien käytöllä ei ole vaikutusta tilojen astetuntilukuihin. Tarkemmat aurinkopaneelien käyttöä koskevat simulointien tulokset on esitetty liitteessä 11.



**KUVA 24. Rakennuksen E-luku aurinkopaneeleista saatavan suhteellisen energiamäärän funktiona eri energian käyttökohteilla**

Kuvasta 24 havaitaan, että sähköenergian tuottamisella aurinkopaneeleiden avulla valaistuksen (punainen käyrä) ja LVI-laitteiden (vihreä käyrä) tarpeisiin on E-lukuun likimain yhtä suuret vaikutukset, täten käyrät ovat päällekkäin.

#### 4.9 Valaisimet

E-lukulaskennassa on Suomen rakennusmääräyskokoelman osassa D3 [1] valaistukselle annettu standardikäytön mukainen ominaissähköteho, joka on kerrostalolla  $11 \text{ W/m}^2$ . Tämä vaikuttaa rakennuksen valaistuksen sähköenergian tarpeeseen ja tätä kautta E-lukuun sekä aiheuttaa osan tilojen lämpökuormasta. Standardikäytön mukaisesta arvosta voidaan kuitenkin poiketa, mikäli valaistustaso säilyy. Asiasta on säädetty Suomen rakennusmääräyskokoelman osassa D3 seuraavasti:

"3.3.3 Taulukossa 3 on annettu E-luvun laskennassa käytettävät valaistuksen ohjearvot uudisrakennuksille. Kokonaisenergiankulutuksen laskennassa pienempää valaistustehoja voidaan käyttää mikäli valaistustaso säilyy. Valaistustasosta on tällöin esitettävä erillisselvitys energialaskennan lähtötietojen osana.

## Selostus

Tilakohtaisia valaistuksen valaistustason ohjearvoja on annettu esimerkiksi standardissa SFS-EN 12464-1." [1.]

Suomen rakennusmääräyskokoelman osa D5 [9, s.29] antaa ohjeet valaistuksen sähkönkulutuksen laskemiseen, jos rakennuksen valaistusjärjestelmä tiedetään tarkasti. Standardi SFS-EN 12464-1 [17] koskee kuitenkin vain työkohteiden valaistusta ja julkisia rakennuksia. Asuinrakennuksille ei ole olemassa omaa standardia, joka määritteli tilakohtaiset valaistustasot [18]. Täten standardin SFS-EN 12464-1 tietoja ei voida täysin luotettavasti käyttää suunniteltaessa asuinrakennusten valaistusta. Kyseisen standardin taulukoissa 5.1 - 5.5 on kuitenkin annettu valaistustason arvoja työpaikkojen yleisille tiloille, jotka voidaan tulkinnanvaraisesti rinnastaa käytettäväksi asuinrakennuksen tiloissa.

Valaistustason arvoja on annettu myös Internetissä Motivan ylläpitämillä lampputietosivuilla [18]. Kyseisen lähteen tiedot perustuvat juurikin työkohteiden valaistustasoihin ja näkötehtävien suorittamisen minimivalaistustasoihin sekä ottavat huomioon energiatehokkuuden. Taulukkoon 8 on koottu näiden kahden lähteen mukaisia eri tilojen valaistustason arvoja sekä simuloinneissa käytetyt valaistustason arvot.

**TAULUKKO 8. Valaistustason arvoja eri tiloille [17; 18]**

Tila	Valaistustaso, $E_i$ (lx) (SFS-EN 12464-1 [17])	Valaistustaso, $E_i$ (lx) (Motiva [18])	Simulointien valaistustaso, $E_i$ (lx)
Tekninen tila	200	-	200
KPH / WC / Pu- kuh. / S	200	50 (sauna 30)	100
VH / Varasto / VSS	200	100...200	200
MH	100	300...500	300
OH	-	300...500	300
Porrash.	100	-	100
Hissi	100	-	100
K	200	0...500	300



Kerhotila	-	-	300
KHH	200	300...500	300
ET	-	150	150

Valaisimien vuotuinen sähkönkulutus voidaan laskea yhtälöstä (8) [9, s.29].

$$W_{valaistus} = \sum \phi_{val,omin} A_{huone} \Delta T_{valaistus} f_{val,ohj} / 1000 \quad (8)$$

Simulointiohjelmalla E-lukua ja astetuntilukua laskettaessa tulee kuitenkin laskea valaistuksen ominaissähköteho  $\phi_{val,omin}$  huonekohtaisesti. Suomen rakennusmääräyskoelman osassa D5 [9, s.29] on lisäksi annettu valaistuksen ohjaustavasta riippuvia ohjauskertoimia  $f_{val,ohj}$ , jotka tulee huomioida laskennassa. Simulointiohjelmaa käytettäessä tämä onnistuu, kun valaistuksen ominaissähköteho  $\phi_{val,omin}$  kerrotaan kertoimella  $f_{val,ohj}$  ja syötetään kertoimella painotettu ominaissähköteho  $\phi_{val,omin,f}$  simulointiohjelmaan.

Täten yhden tilan valaistuksen ohjauskertoimella  $f_{val,ohj}$  painotettu valaistuksen ominaissähköteho  $\phi_{val,omin,f}$  voidaan laskea yhtälöstä (9) [9].

$$\phi_{val,omin,f} = \frac{1}{\beta \eta_{valaistus} \eta_{Km}} E_i f_{val,ohj} \quad (9)$$

Taulukoissa 9 ja 10 on esitetty tässä insinöörityössä valaistuksen sähköenergianlaskentaan käytetyt arvot, joita tarvitaan kaavoissa (8) ja (9) [9, s.29-30].

#### TAULUKKO 9. Valaistuksen sähköenergianlaskennassa käytettyjä arvoja

Tekijä	Arvo	Huom.
Valaistuksen ohjauskertoin, $f_{val,ohj}$	0,9	Huonekohtainen kytkin
Valaistuksen alenemakerroin, $\beta$	0,60	Keskinkertainen ympäristö
Valaistuksen hyötysuhde, $\eta_{valaistus}$	0,35	Yhdistetty suora-epäsuora valaistus

**TAULUKKO 10. Eri valaisintyyppien valotehokkuuksia,  $\eta_{Km}$  [9]**

Valaisin tyyppi	Valotehokkuus $\eta_{Km}$ (lm/W)
Hehkulamppu	10
Halogeenilamppu	12
Pienoisloistelamppu "energiansäästölamppu"	50
LED	50
Loistelamppu	80

Tässä insinöörityössä käytetyt tilakohtaiset, valaistuksen ohjauskertoimella  $f_{val,ohj}$  painotetut valaistuksen ominaissähkötehot  $\phi_{val,omin,f}$ , on laskettu kaavaa (9) käyttäen liitteessä 12.

Lisäksi valaistuksen käyttöaika  $\Delta T_{valaistus}$  tulee standardikäytöstä poiketen muuttaa vastaamaan Suomen rakennusmääräyskokoelman osan D5 taulukon 4.3 arvoa, joka on asuinkerrostalolle 550 h/a [9, s.30]. Suomen rakennusmääräyskokoelman osassa D5 [9] ei kuitenkaan ole määritelty, miten tämä 550 h/a jakautuu vuoden eri päiville. Kesäaikaan valaistus aiheuttaa osan tilan lämpökuormasta, kun taas talvella alhainen valaistusteho ei lämmitä rakennusta yhtä paljoa kuin korkeampi valaistusteho, jolloin rakennusta lämmitetään enemmän kaukolämmöllä.

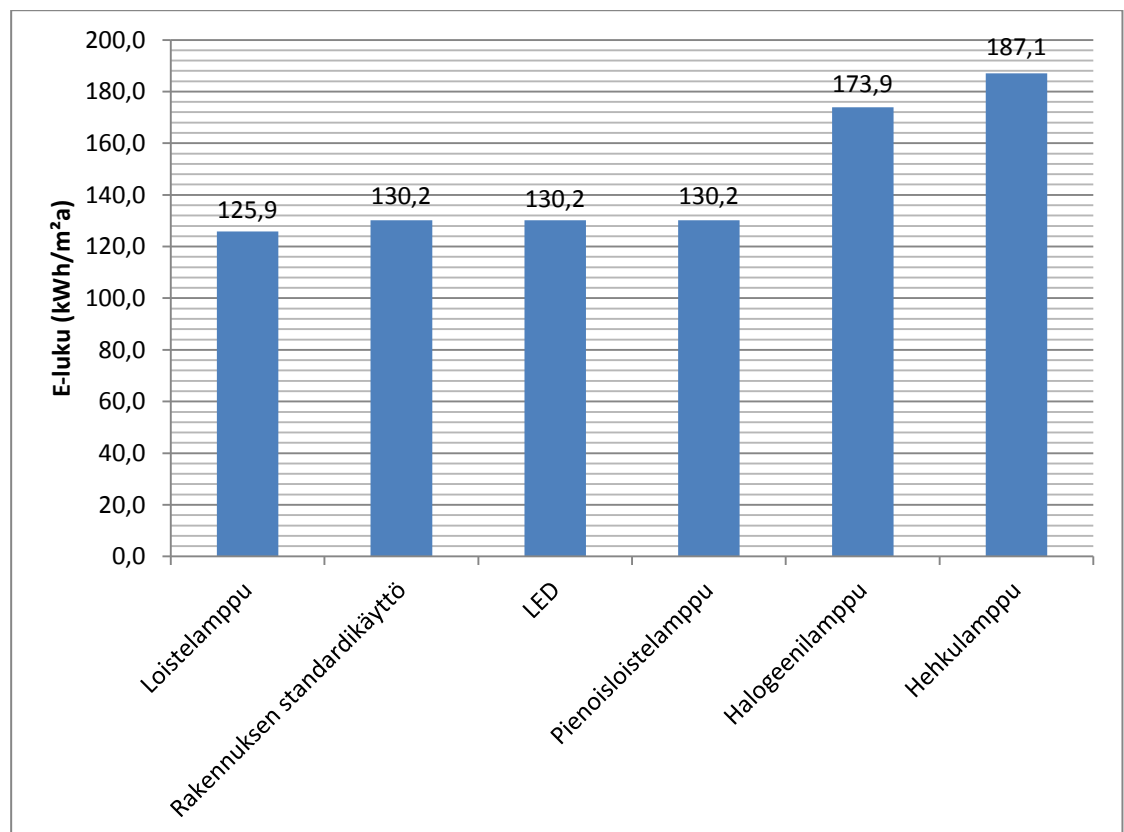
Koska tarkempaa tietoa ei ole käytettävissä, valaistuksen käyttöaika on tässä insinöörityössä jaettu käyttäen hyväksi Suomen rakennusmääräyskokoelman osan D3 [1] taulukkoa L2.2. Kyseisessä taulukossa on annettu auringon kokonaissäteilyenergia pystypinnoille  $G_{säteily,pystypinta}$  ilmansuunnittain säävyöhykkeillä 1 ja 2. Kun auringon vuotuinen kokonaissäteilyenergia jaetaan eri kuukausille edellä mainitun taulukon perusteella, voidaan valaistuksen käyttöajan olettaa olevan kääntäen verrannollinen auringon kokonaissäteilyenergian jakautumiseen. Toisin sanoen, auringon kokonaissäteilyenergian ollessa suurin heinäkuussa on valaistuksen käyttöaika pienin. Vastaavasti talvella tilanne on päinvastainen.

Liitteessä 12 on laskettu valaistuksen 550 tunnin vuotuisen käyttöajan jakautuminen eri kuukausille auringon säteilyenergian määrän perusteella. Laskenta ei ota huomioon, sijaitseeko tila rakennuksen keskellä vai jollain julkisivulla. Jos tila rajoittuu ulkoseinään, auringon aiheuttamat valaistusominaisuudet ovat lisäksi erilaiset eri jul-

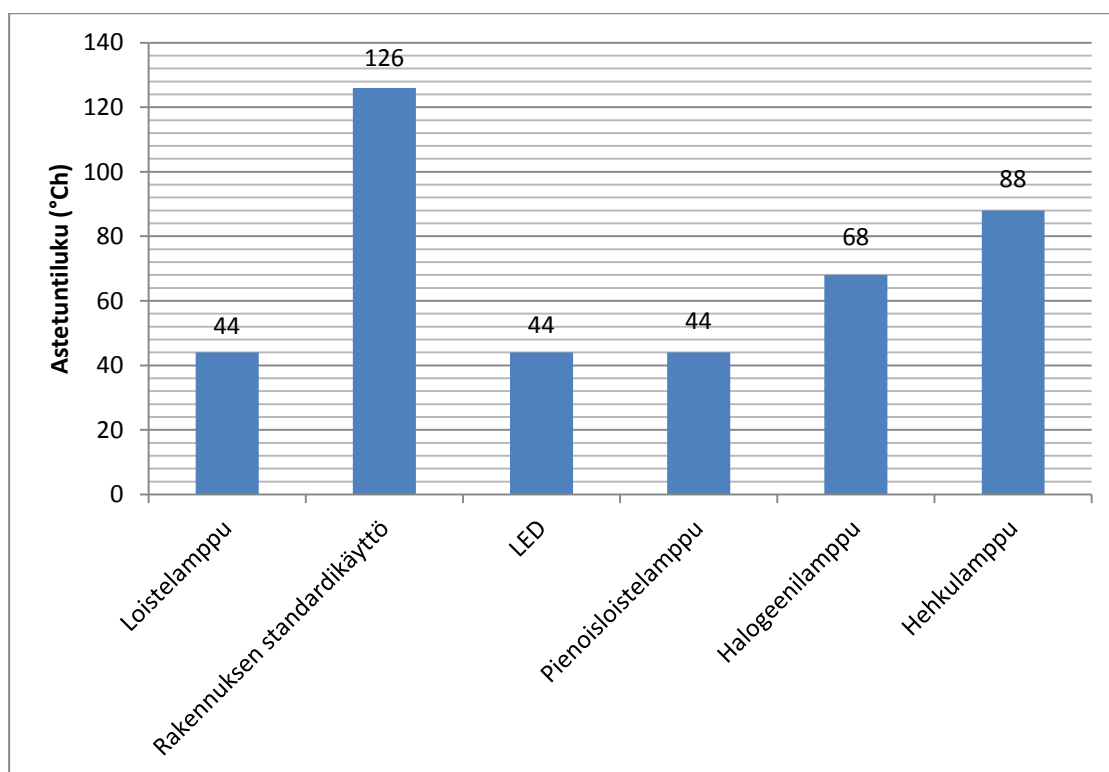
kisivujen kesken. Käyttöaikoja laskettaessa ei ole otettu myöskään huomioon tilojen käyttötarkoituksia. Käytännössä olohuoneissa ollaan läsnä huomattavasti useammin ja kauemmin kuin esimerkiksi kerrostalorakennuksen teknisissä tiloissa.

Tämän insinööriyön valaistuksen käyttöajan laskennassa on valaistuksen käyttöaika siis määritetty samaksi kaikille tiloille. Valaistuksen käyttöajan huippu on tässä insinööriyössä ajoitettu joka kuukaudelle klo 22.00-23.00 väliselle ajalle, jolloin on vuoden ajasta riippuen hämärää tai pimeää, mutta ihmiset eivät vielä oletettavasti ole nukkumassa. Näiden tekijöiden lisäksi laskennassa tarvitaan huoneen pinta-ala, jonka simulointiohjelma laskee rakennuksen geometriamallista.

Kun  $\phi_{val,omin,f}$  -arvot sekä valaistuksen käyttöaika syötetään RIUSKA:an, saadaan ohjelma mallintamaan rakennus erilaisilla valaisinmalleilla. Eri valaisimien käytön vaikutus rakennuksen E-lukuun on esitetty kuvassa 25 ja tilan 418 astetuntilukuun kuvassa 26, kun valaistuksen ominaissähkötehot on määritetty Suomen rakennusmääräyskokoelman osan D5 [9] mukaisesti. Tarkat valaisimia koskevat simulointien tulokset on esitetty liitteessä 13. Simuloinneissa kaikissa rakennuksen tiloissa on käytetty samaa valaisintyyppiä.



**KUVA 25. Valaisintyyppin vaikutus rakennuksen E-lukuun**



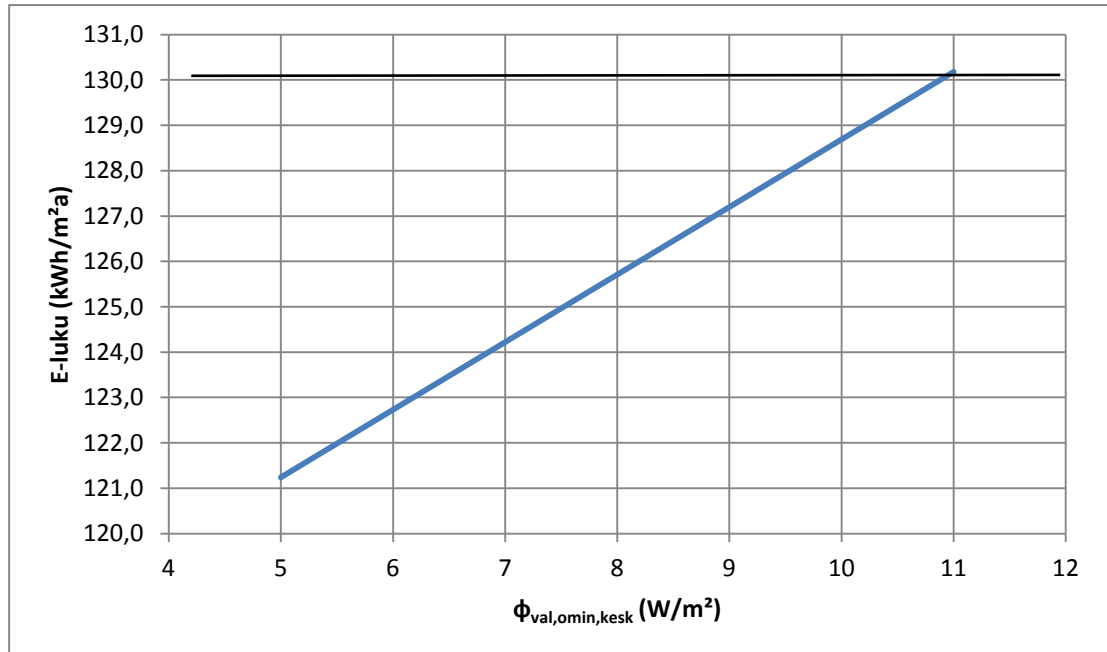
**KUVA 26. Valaisintyyppin vaikutus tilan 418 astetuntilukuun**

Rakennuksen valaistussuunnittelu kuuluu sähkösuunnittelijan lisäksi joskus erilliselle valaistussuunnittelijalle, joka laskee energiasimulointeja tekevälle henkilölle valaistuksen ominaissähkötehtarpeen ja laatii selvityksen valaistuksen energiatehokkuudesta. Täten edellä esitetty valaistuksen ominaissähkötehtarpeen laskenta siirtyy valaistussuunnittelijan työksi. Valaistussuunnittelija ottaa valaisintyyppin lisäksi huomioon esimerkiksi ikkunoiden kautta saatavan luonnonvalon vaikutuksen [17]. Eri tiloissa käytetään tyypillisesti myös erilaisia valaisimia.

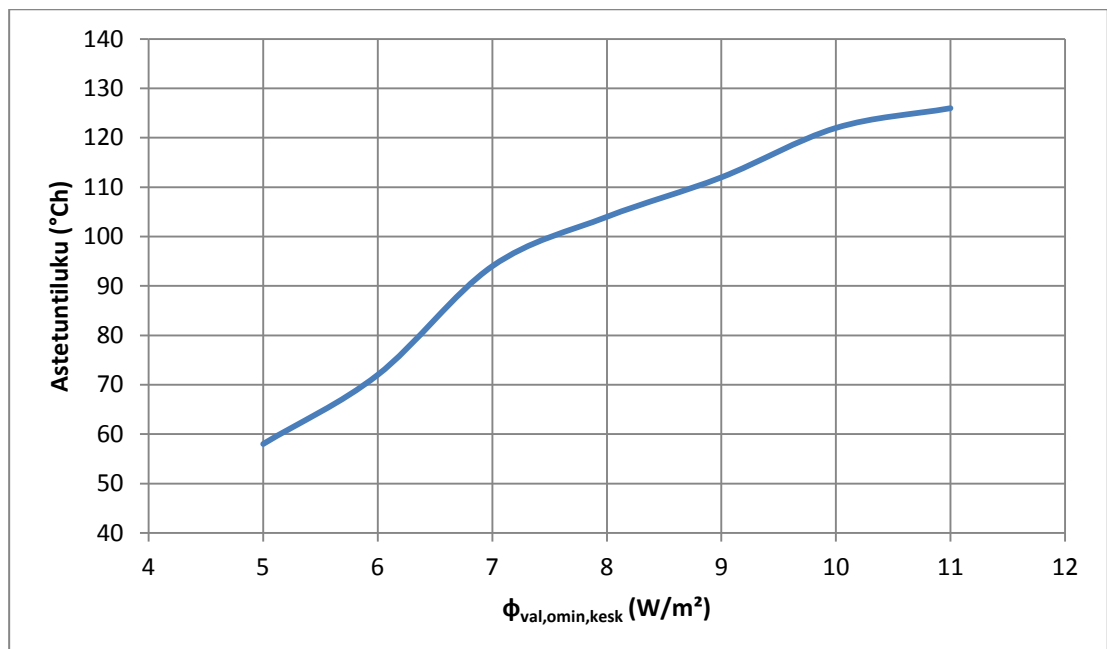
Nämä seikat osaltaan vaikuttavat valaistuksen tehtarpeeseen, mutta niitä ei tuloksissa (kuvat 25 ja 26, sekä liite 13) ole huomioitu. Valaistussuunnitteluun on lisäksi saatavilla simulointiohjelmia Internetissä, jotka laskevat valaistuksen sähkötehon. Toisin sanoen muitakin Suomen rakennusmääräyskokoelman osasta D5 [9] poikkeavia menetelmiä valaistuksen sähkötehon laskentaan on olemassa.

Tässä insinöörityössä tutkittiin rakennuksen tilojen pinta-aloilla painotetun keskimääräisen valaisimien ominaissähkötehon  $\phi_{\text{val,omin,kesk}}$  vaikutusta rakennuksen E-lukuun ja tilan 418 astetuntilukuun, siltä varalta että valaistuksen ominaissähköteho määritetään Suomen rakennusmääräyskokoelman osasta D5 [9] poikkeavalla tavalla. Kuvassa 27 on esitetty rakennuksen E-luvun riippuvuus valaistuksen keskimääräisestä ominais-

sähkötehosta  $\phi_{\text{val,omin,kesk}}$ . Kuvassa 28 on esitetty tilan 418 astetuntiluvun riippuvuus valaistuksen keskimääräisestä ominaissähkötehosta  $\phi_{\text{val,omin,kesk}}$ . Tarkemmat valaistuksen ominaissähkötehoa koskevat simulointien tulokset on esitetty liitteessä 13.



**KUVA 27. Rakennuksen E-luku valaistuksen keskimääräisen ominaissähkötehon  $\phi_{\text{val,omin,kesk}}$  funktiona**



**KUVA 28. Tilan 418 astetuntiluku valaistuksen keskimääräisen ominaissähkötehon  $\phi_{\text{val,omin,kesk}}$  funktiona**

#### 4.10 Eri tekijöiden yhteisvaikutukset

Tässä insinöörityössä on tutkittu yhteensä yhdeksän eri tekijän vaikutusta kaukolämpöön liitettävän asuinkerrostalon E-lukuun. Näistä tekijöistä voidaan muodostaa lukuisia erilaisia ratkaisuja rakennuksen E-luvun pienentämiseksi. Monilla erilaisilla ratkaisuilla voi olla samanlainen yhteisvaikutus E-lukuun ja tutkittavan tilan astetuntilukuun. Tässä luvussa on esitetty vain yksi malli, jolla rakennuksen energiatehokkuutta voidaan parantaa ja E-lukua laskea. Rakennuksen yllälämpenemisen osalta on tutkittu tilan 418 astetuntilukua, jonka lämpökuormat siis olivat tiloista suurimmat ja jonka yllälämpenemistä tulee täten tarkkailla Suomen rakennusmääräyskokoelman osan D3 mukaisesti [1].

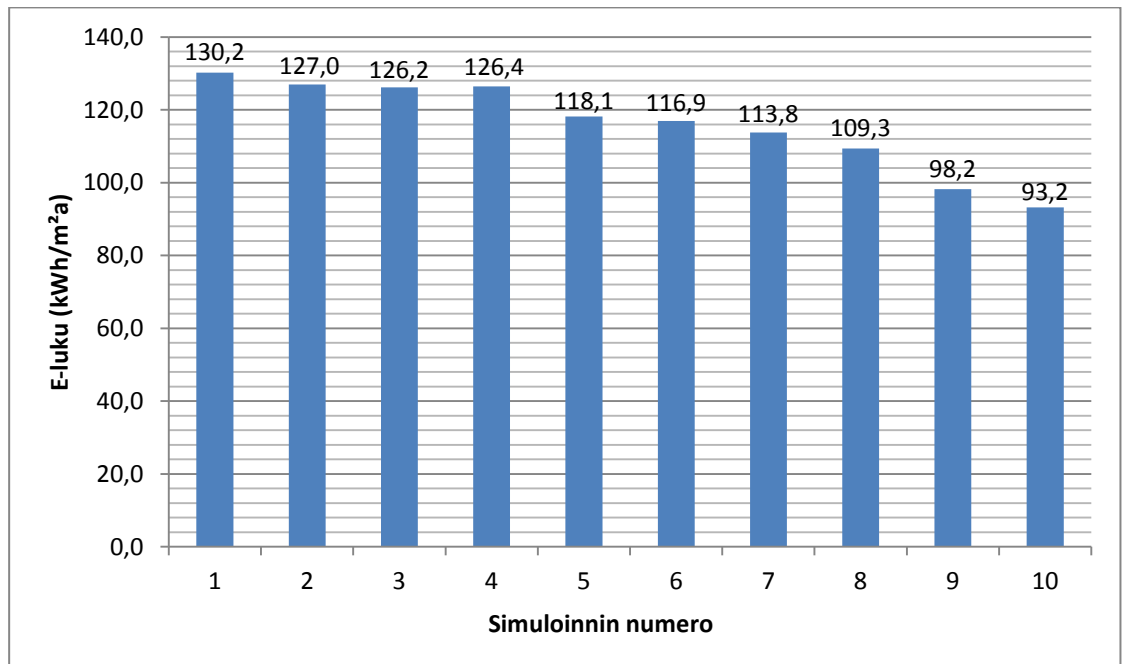
Eri tekijöiden yhteisvaikutusta lähdetään tutkimaan tässä insinöörityössä käytetyn perusmallin avulla, jolloin rakennuksen E-luku on  $130,2 \text{ kWh/m}^2\text{a}$  ja tilan 418 astetuntiluku on  $126 \text{ }^\circ\text{Ch}$ . Muut lähtötiedot on esitetty luvussa 3. Tässä luvussa perusmallille tehtävät muutokset ovat teoriassa toteutettavissa nykyajan laitteilla ja materiaaleilla. Joitain tekijöitä voitaisiin hieman tehostaa vielä entisestään E-luvun alentamiseksi. Esimerkiksi vaipan lämpöhäviöitä voitaisiin alentaa edelleen, mutta tämä olisi johtanut astetuntiluvun kasvuun yli Suomen rakennusmääräyskokoelman osan D3 [1] salliman rajan. Yleisesti ottaen tässä luvussa esitetyt ratkaisut edustavat nykyisillä laitteilla ja materiaaleilla energiatehokasta rakentamista.

Perusmallin E-lukua muutetaan tässä insinöörityössä aiemmin tutkittujen tekijöiden avulla. Perusmalliin lisätään parvekelasit, vaikka sen tiedetään luvun 4.3 perusteella hieman nostavan rakennuksen E-lukua. Parvekelasien lisääminen ei myöskään alenna tilan 418 astetuntilukua, koska kyseisen tilan ulkoseinällä ei ole parveketta. Ikkunoiden pinta-alaa ei muuteta, koska perusmallin ikkunoiden pinta-ala on jo ennestään alhainen.

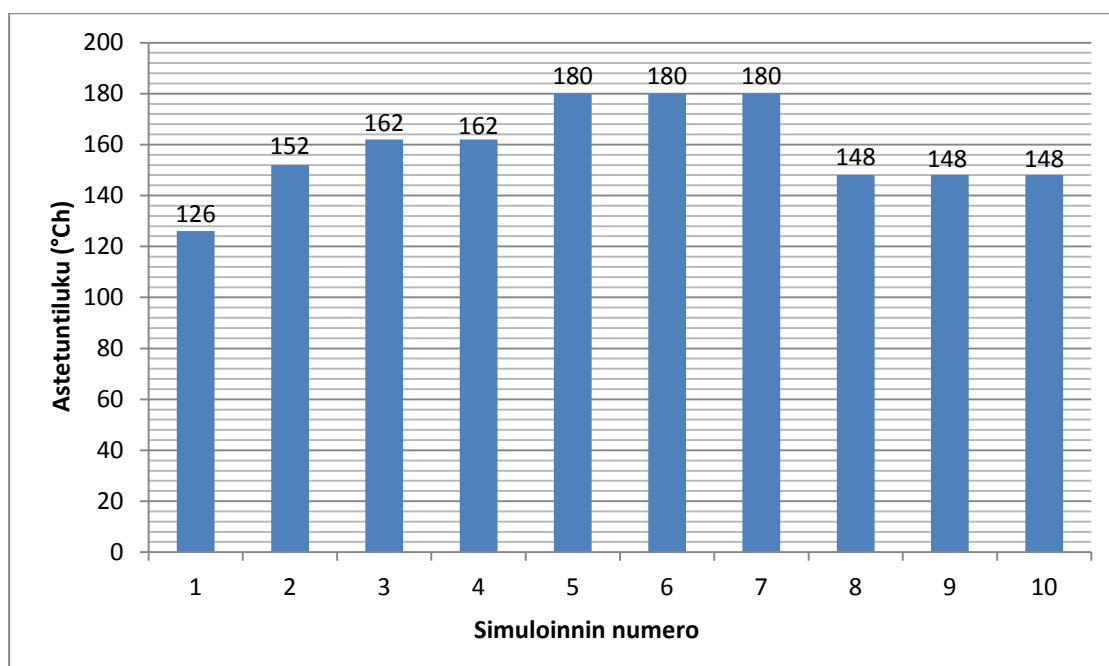
Perusmallin E-lukua lähdetään muuttamaan seuraavilla toimenpiteillä ja seuraavassa järjestyksessä:

1. Perusmalli.
2. Vaipan johtumislämpöhäviöiden alentaminen ( $U_{US1} = 0,11 \text{ W/m}^2\text{K}$ ,  $U_{AP1} = 0,09 \text{ W/m}^2\text{K}$  ja  $U_{YP1} = 0,09 \text{ W/m}^2\text{K}$ )
3. Vaipan ilmatiiviyyden parantaminen ( $q_{50} = 1,0 \text{ m}^3/\text{h},\text{m}^2$ )
4. Parvekelasien lisääminen (Lasien ST-arvo 75 %)
5. Ilmanjakotavan vaihtaminen hajautetuksi järjestelmäksi, ilmanvaihtokonehuoneiden poisto rakennuksesta sekä huoneistokohtaisen ilmanvaihdon ohjauksen lisääminen ( $q_{v,\text{omin}} = 0,4 \text{ dm}^3/\text{s},\text{m}^2$ )
6. Ilmanvaihdon puhaltimien sähköenergian pienentäminen (Yhden puhaltimen  $\text{SFP} = 0,7 \text{ kW}/(\text{m}^3/\text{s})$ )
7. Ilmanvaihdon lämmöntalteenoton tehostaminen ( $\eta_{t,\text{mit}} = 0,75$ )
8. Valaisinsähköenergian pienentäminen ( $\phi_{\text{val},\text{omin},\text{kesk}} = 7 \text{ W/m}^2$ )
9. Käyttöveden lämmittäminen osaksi aurinkokeräimillä ( $\eta_{\text{keräimet,LKV}} = 0,4$ )
10. LVI-laitesähkön tuottaminen osaksi aurinkopaneeleilla ( $\eta_{\text{paneelit,LVI}} = 0,4$ )

Kuvassa 29 on esitetty perusmallin E-luvun kehittyminen edellä esitetyssä järjestyksessä ja edellä esitetyillä menetelmillä yksi muutos kerrallaan. Kuvassa 30 on esitetty samojen muutosten vaikutus tilan 418 asetuntilukuun. Tarkat eri tekijöiden yhteisvaikutuksia koskevien simulointien tulokset on esitetty liitteessä 14.



**KUVA 29.** Perusmallin E-luvun kehittyminen edellä mainittujen muutosten johdosta, yksi tekijä kerrallaan



**KUVA 30. Tilan 418 astetuntiluvun kehittyminen edellä mainittujen muutosten johdosta, yksi tekijä kerrallaan**

Korostettakoon sitä, että samaan E-lukuun ja tilan 418 astetuntilukuun voidaan päästä erilaisilla ratkaisulla. E-lukuun vaikuttavia tekijöitä on tässä insinöörityössä tutkittujen yhdeksän tekijän lisäksi lukuisia.

## 5 TULOSTEN TARKASTELU

Tässä luvussa on käsitelty simulointien tuloksia. Tulokset ovat täysin luotettavia vain tässä insinöörityössä käytetyllä perusmallilla simuloitaessa, joka sisältää rakennuksen geometrian lisäksi tiedot rakennuksessa käytettävistä järjestelmistä. Yksiselitteistä yksittäisen tekijän vaikutuksen suuruutta mille tahansa asuinkerrostalorakennukselle ei työn perusteella pystytä kertomaan, mutta tuloksista voidaan kuitenkin tehdä johtopäätöksiä, millä tekijöillä on suuri ja millä pieni vaikutus kaukolämpöön liitetyn kerrostalon E-lukuun ja kyseisen rakennuksen tilojen astetuntilukuihin.

Tuloksissa on huomattava, että käyttöveden, tilojen ja ilmanvaihdon lämmitysenergiaan, jäähdytysenergiaan ja LVI-laitteiden, kuluttajalaitteiden sekä valaistuksen sähköenergiaan vaikuttaa keskeisesti rakennuksen lämmitetty nettoala,  $A_{\text{netto}}$ . Jos näitä tekijöitä tarkastellaan isommassa kerrostalossa, voivat tuloksien erot olla suurempia ja vastaavasti pienemmässä kerrostalossa pienempiä. Toisaalta koska rakennuksen koko



vaikuttaa näihin kaikkiin tekijöihin samanaikaisesti, ei yhden tekijän merkitys välttämättä kasva sen suuremmaksi kuin tässä työssä käytetyn perusmallin rakennuksessa.

Rakennuksen koon vaikutusta tulisikin tarkastella erillisenä tekijänä, jotta sen vaikutus eri järjestelmien energiankulutukseen ja koko rakennuksen E-lukuun saataisiin selvitettyä. Tämä on kuitenkin käytännössä hankalaa, koska eri rakennukset eroavat toisistaan mm. rakennusgeometriansa ja ikkunoiden pinta-alojensa osalta, vaikka tekniset järjestelmät pysyisivätkin samoina.

Lisäksi on huomattava, että esimerkiksi valaisimien sähköenergian pienentäminen yhdellä kilowattitunnilla rakennuksen lämmitettyä nettoneliötä kohden vuodessa ei alenna E-lukua 1,7 kilowattitunnilla rakennuksen lämmitettyä nettoneliötä kohden vuodessa, vaikka niin voisi kaavasta (1) päätellä. Valaisimien kuluttama sähköenergia muuttuu rakennuksessa lämpöenergiaksi, jolloin oheistuotteena saadaan valoa. Jos valaistuksen sähköenergian kulutusta pienennetään, joudutaan lämmitysenergiavaje kattamaan ostamalla enemmän kaukolämpöä. Täten yhden tekijän muutos vaikuttaa joskus myös muihin tekijöihin, joista rakennuksen E-luku muodostuu.

## **5.1 Rakennuksen vaipan lämmönläpäisy**

U-arvoja koskevien tulosten perusteella (kuvat 6 ja 8, sekä liitteet 3 ja 4) voidaan todeta, että minkään yksittäisen rakenteen U-arvolla ei ole suurta vaikutusta rakennuksen E-lukuun, jos U-arvoa muutetaan kohtuudella. Sen sijaan, jos useamman rakenteen U-arvoja parannetaan kerralla, voidaan saavuttaa merkittävä parannus rakennuksen E-lukuun. Tämä käy ilmi kuvien 10 ja 11 perusteella, joissa on tutkittu eri rakenteiden U-arvojen yhteisvaikutuksia rakennuksen E-lukuun. On huomattava, että vaipan eristystä lisättäessä E-luku pienenee, mutta astetuntiluku kasvaa. Eli toivottu muutos E-luvussa aiheuttaa ei-toivotun muutoksen astetuntilukuun ja päinvastoin.

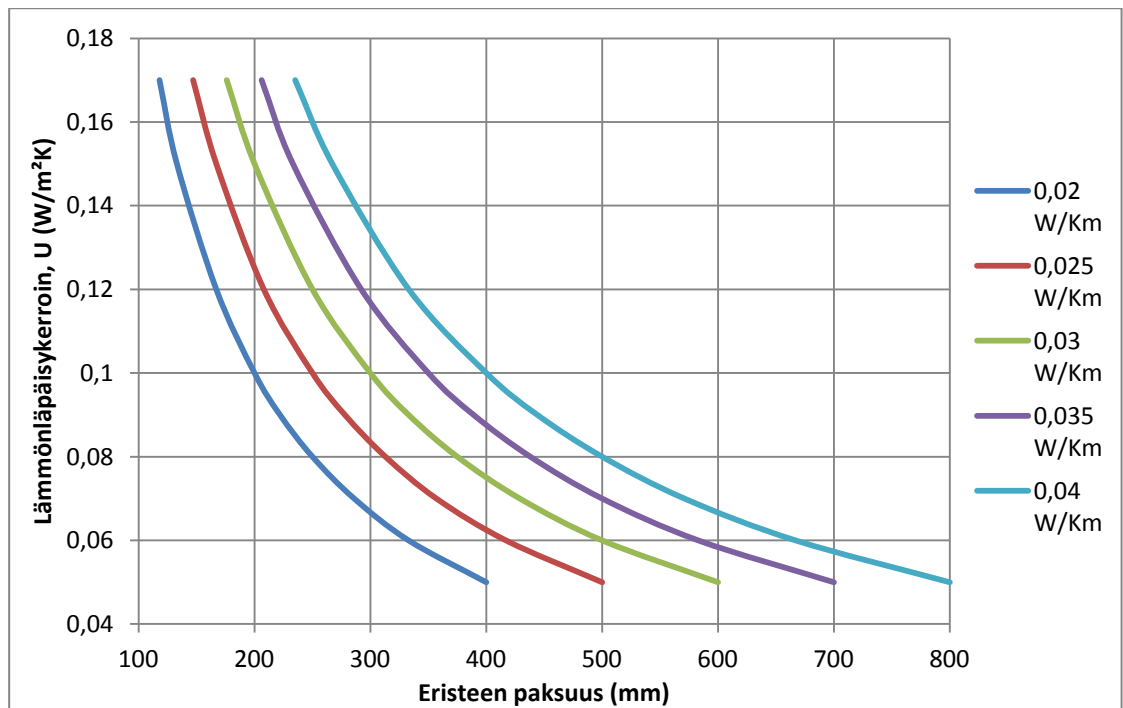
Ikkunoiden ja ulkoseinien U-arvojen muutoksella on suurin vaikutus rakennuksen E-lukuun vaipan rakenneosien kesken. Tämä havaitaan kuvien 6 ja 8 käyrien kulmaker-toimista. Puurunkoisen kerrostalon kohdalla myös yläpohjan U-arvolla on suuri vaikutus rakennuksen E-lukuun verrattuna muihin rakenteisiin. Betonirakenteisessa kerrostalossa yläpohjan U-arvolla ei ole yhtä suurta vaikutusta. Molempien tapausten kohdalla voidaan todeta, että alapohjan ja ulko-ovien U-arvoilla ei ole suurta vaikutusta

rakennuksen E-lukuun. Kaikkien rakenneosien U-arvon pienentämisellä on E-lukua alentava vaikutus.

Rakennuksen E-luku on lineaarisesti riippuvainen rakenteiden U-arvoista muilla rakennuksen vaipan osilla kuin ikkunoilla. Ikkunoiden kohdalla rakennuksen E-lukuun vaikuttaa U-arvon lisäksi ikkunan  $g_w$ -arvo. Näiden tekijöiden yhteisvaikutus aiheuttaa epälineaarisen riippuvuuden rakennuksen E-lukuun. Kuvista 6 ja 8 havaitaan, että ikkunan U-arvon kasvaessa yli  $1,05 \text{ W/m}^2\text{K}$  ei U-arvolla ole enää juurikaan vaikutusta rakennuksen E-lukuun (perusmallin tiedoilla simuloitaessa).

Rakennuksen vaipan energiatehokkuutta tulee tarkastella myös eristepaksuudesta riippuvaisena. U-arvoja koskevien simulointien perusteella (liitteet 3 ja 4) voidaan todeta, että kaikista rakenteista ulkoseinien eristepaksuuden muuttamisella saavutetaan suurin vaikutus rakennuksen E-lukuun. Seuraavaksi pienempi vaikutus on yläpohjan eristepaksuudella ja täten pienin vaikutus alapohjan eristepaksuudella. Rakenteiden U-arvot riippuvat eristepaksuuden lisäksi eristeen lämmönjohtavuudesta  $\lambda$  ja rakenteiden muista rakennemateriaaleista, jolloin eristepaksuuden muutoksella ulkoseinissä saavutetaan suurin vaikutus vain tämän insinööriyön rakenteiden kohdalla. Muunlaisten rakenteiden kohdalla tilanne voi erota vertailluista rakenteista.

Rakenteen U-arvo ei kuitenkaan riipu lämmöneristeen paksuudesta lineaarisesti. Eristepaksuuden kasvattaminen ei ole enää järkevää, kun seinän eristepaksuus kasvaa suureksi. Tämä havaitaan simulointien tuloksien (liitteet 3 ja 4) lisäksi kuvasta 31, jossa on esitetty eristeen U-arvo eristepaksuuden funktiona eri eristeen lämmönjohtavuuksilla,  $\lambda$  [3].



**KUVA 31. Eristeen U-arvo eristepaksuuden funktiona eri lämmönjohtavuuksilla  $\lambda$  [3]**

Jos rakenteen eristepaksuus on ennestään suuri, ei sen kasvattamisella edelleen saavuteta enää yhtä suurta hyötyä kuin pienemmän eristepaksuuden kasvattamisella (olettaen että lämmönjohtavuus  $\lambda$  pysyy vakiona). Tällöin U-arvon pienentämiseksi kannattaa käyttää eristettä, jonka lämmönjohtavuus  $\lambda$  on pienempi. Yksityiskohtaiset kaavat rakennuksen yksittäisen rakenteen lämmönläpäisykertoimen, eli U-arvon määrittämiseen on esitetty Suomen rakennusmääräyskokoelman osassa C4 [19].

U-arvon vaikutusta astetuntilukuun tutkittaessa eri tiloja ei voi vertailla keskenään niiden erilaisten lämpökuormien takia. Voidaan kuitenkin todeta, että ovien U-arvolla ei ole juurikaan vaikutusta tilan 126 astetuntilukuun (katso kuvat 7 ja 9). Sen sijaan, jos tila, jonka ylälämpenemistä tutkitaan, sijaitsee alakerrassa, on alapohjan U-arvolla merkittävä vaikutus tilan astetuntilukuun niin betonikerrostalossa kuin puukerrostalossakin. Tulee huomata, että tässä insinöörityössä molempia rakennustyyppiejä simuloitaessa käytettiin maanvaraista ala-pohjaa. Selvästi suurin ja laajin vaikutus tilojen astetuntilukuihin rakenteiden U-arvon osalta on ikkunoilla. Vaikutusta on myös yläpohjalla, alapohjalla ja ulkoseinillä. Kaikkien rakenteiden osalta U-arvon pienentäminen suurentaa rakennuksen astetuntilukua.

Ikkunoiden U-arvon vaikutus astetuntilukuun perustuu siihen, että pienemmällä ikkunan U-arvolla lämpö ei pääse johtumaan ulos tilasta yhtä hyvin kuin suuremmalla U-arvolla. Kuitenkin tilan lämpökuormat pysyvät samoina (olettaen että ikkunan  $g_w$ -arvo pysyy vakiona). Molemmissa tutkituissa tapauksissa ikkunoiden U-arvon vaikutus astetuntilukuun pienenee tilassa 418, kun ikkunan U-arvo kasvaa tarpeeksi suureksi.

Jos verrataan betonikerrostalon ja puukerrostalon U-arvojen simulointien tuloksia, huomataan, että vaikka molemmissa tapauksissa rakenteilla on samat U-arvot, eroavat E-luku sekä astetuntiluku eri tapausten välillä. Tämä johtuu rakenteiden eristeen sisäpuolisesta lämpökapasiteetista. Koska puurakenteinen kerrostalo ei varaa lämpöä ja tasaa lämpövaihteluita yhtä hyvin kuin betonirakenteinen kerrostalo, tarvitaan kylminä öinä lämmitystä myöhään keväällä ja aikaisin syksyllä.

Aстетuntiluvun kohdalla betonikerrostalon suurempi rakenteiden sisäpuolinen lämpökapasiteetti tasaa lämpötilan vaihteluita ja alentaa astetuntilukua. Tämän takia puurunkoisen kerrostalon tilojen astetuntiluvut riippuvat voimakkaammin rakenteiden U-arvoista. Koska betonikerrostalon E-luku sekä astetuntiluku ovat pienempiä verrattuna puukerrostaloon, voidaan todeta, että on parempi vaihtoehto rakentaa kerrostalo lämpöä varaavista rakenteista.

Varsinkin astetuntiluvun kohdalla etu betonirakenteen hyväksi on merkittävä. Jos verrataan tämän insinööriyön betonikerrostalon ja puukerrostalon tuloksia huomataan, että tilan 418 astetuntiluku kasvaa yli kuusinkertaiseksi siirryttäessä betonikerrostalosta puukerrostaloon, vaikka rakenteiden U-arvot ja muut simulointien lähtötiedot pysyvät samoina. Täten puukerrostalossa muodostuu helposti ylilämpenemisongelma, koska rakenteet eivät tasaa lämpövaihteluita. Tämä tarkoittaa monesti jäähdytysjärjestelmän tarvetta puukerrostaloa suunniteltaessa.

Tässä insinööriyössä simuloitiin rakennuksen vaipan osalta myös ilmatiiviyyttä. Tulosten (kuvien 17 ja 18) perusteella ilmatiiviydellä on mihin tahansa yksittäisen rakenteen U-arvoon verrattuna suurempi vaikutus rakennuksen E-lukuun. Kuitenkin vaipan ilmatiiviyden vaikutus jää verrattain pieneksi, jos sitä verrataan esimerkiksi lämmöntalteenoton tehostamiseen, useamman rakenneosan lämmönjohtavuuden alentamiseen tai aurinkoenergian käyttöön. Vaipan ilmatiiviyys vaikuttaa myös tilan 418 astetuntilukuun.

E-luku riippuu ilmanvuotoluvusta  $q_{50}$  lineaarisesti ja tilan 418 astetuntilukukin lähes lineaarisesti. Ilmanvuotoluvun,  $q_{50}$  pienentäminen  $0,5 \text{ m}^3/(\text{h},\text{m}^2)$  parantaa E-lukua  $0,8 \text{ kWh/m}^2, \text{a}$  (0,7 %) ja heikentää astetuntilukua tilassa 418 noin 10 % perusmalliin verrattuna. Kuten rakenteiden U-arvoilla, myös vaipan ilmantiiveydellä on vastakkaiset vaikutukset rakennuksen E-lukuun ja tilojen astetuntilukuihin.

## 5.2 Parvekelasituksien säteilyn läpäisy ja ikkunoiden pinta-alat

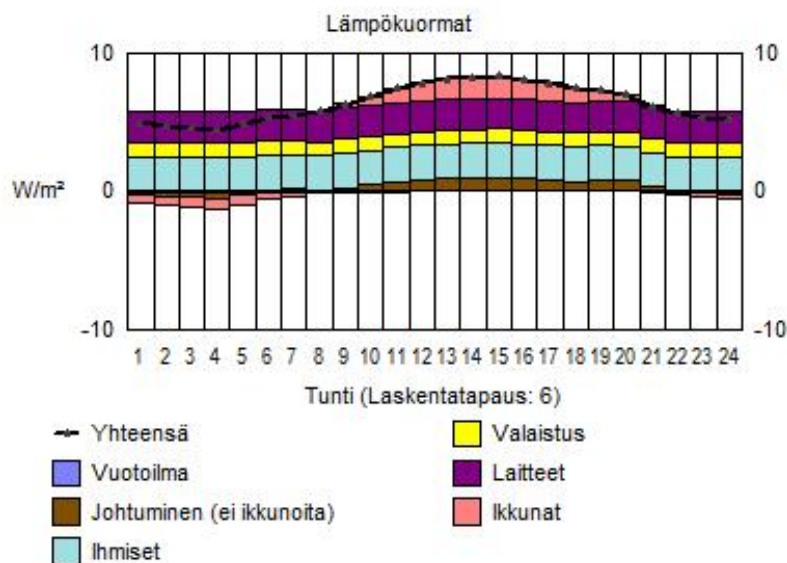
Ikkunoiden pinta-aloja koskevien simulointien tulosten perusteella (kuva 13 ja liite 5) voidaan todeta, että kohtuullisella ikkunapinta-alan muutoksella ei ole juurikaan vaikutusta rakennuksen E-lukuun. E-luku riippuu ikkunoiden pinta-alasta lineaarisesti. Näillä lähtötiedoilla simuloitaessa 10 % muutos ikkunapinta-alassa muuttaa E-lukua vain yhdellä prosenttiyksiköllä (jokaisen ilmansuunnan ikkunoiden kohdalla).

Simuloinnit tehtiin ikkunan U-arvolla  $1,0 \text{ W/m}^2\text{K}$  ja  $g_w$ -arvolla 31 %. Ikkunoiden pinta-alan vaikutus rakennuksen E-lukuun olisi ollut suurempi, jos ikkunan  $g_w$ -arvo olisi ollut suurempi. Yleensä ikkunan  $g_w$ -arvo on välillä 40 - 60 %, kun ei puhuta auringonsuojalaseista. Lisäksi etelän ja lännen puoleisien julkisivujen ikkunoiden pinta-alan vaikutus rakennuksen E-lukuun olisi ollut merkittävästi suurempi, jos näillä julkisivuilla ei olisi ollut syvyydeltään kahden metrin parvekkeita.

Parvekkeiden käyttäminen alensi tässä työssä käytetyn perusmallin kohdalla auringonsäteilyn määrää niin paljon, että ikkunoiden pinta-alalla on likimain yhtä suuri vaikutus rakennuksen E-lukuun kaikkien julkisivujen ikkunoiden kesken. Parvekkeelliseen rakennukseen ei pääse lämpösäteilyä sisään yhtä paljon kuin rakennukseen, jossa ei ole parvekkeita. Täten parvekkeiden käyttäminen alentaa tilojen astetuntilukua, mutta nostaa rakennuksen E-lukua.

Asetuntilukua tarkasteltaessa ikkunan pinta-ala vaikuttaa vain sen tilan astetuntilukuun, jossa ikkuna sijaitsee. Eri tiloja ei voida vertailla keskenään niiden erilaisten lämpökuormien takia. Tulosten perusteella (kuva 14) voidaan kuitenkin yleisesti todeta, että yleensä ikkunapinta-alan kasvattaminen kasvattaa tilan lämpökuormaa lisääntyneen tilaan pääsevän auringon säteilyenergian takia.

Etelänpuoleisia ikkunoita tutkittaessa tilan 245 kohdalla on kuitenkin käynyt toisin. Etelän puoleisissa ikkunoissa on niin isot varjostukset ja pieni  $g_w$ -arvo, että auringon säteilyenergiaa ei pääse pienistä ikkunoista juurikaan sisälle. Tällöin tilan 245 lämpökuorman aiheuttaa pääasiassa ihmiset, valaistus ja kuluttajalaitteet, eli lämpökuorma tulee rakennuksen sisältä. Tämä käy selville myös RIUSKA:sta saatavasta tilakohtaisista lämpökuormakuvaajista. Tilan 245 lämpökuormat 15. päivä heinäkuuta on esitetty kuvassa 32.



**KUVA 32. Tilan 245 lämpökuormat 15. päivä heinäkuuta**

Toisaalta pieni ikkunapinta-ala tarkoittaa isompaa seinäpinta-alaa, jolloin ulkovaipan U-arvo paranee. Nämä seikat yhdessä estävät yllilämmön johtumisen ulos huoneesta. Kun ikkunakokoa kasvatetaan tarpeeksi, huononee vaipan U-arvo ja tilan 245 astetuntiluku kääntyy laskuun. Iso ikkuna kuitenkin huonontaa rakennuksen E-lukua.

Vaikka ikkunoiden pinta-alalla ei ole suurta vaikutusta rakennuksen E-lukuun (käytettäessä näin pientä  $g_w$ -arvoa ja etelä- ja länsijulkisivujen parvekkeita), on se kuitenkin hyvä keino E-luvun pienentämiseksi, koska ikkunoiden pinta-alan pienentäminen pienentää yleensä samalla tilojen astetuntilukua. Yksittäisen tilan kohdalla vaikutus astetuntilukuun voi olla merkittävä.

On huomattava, että simulointien tulokset ovat luotettavia vain perusmallin lähtötiedoilla simuloitaessa. Ikkunoiden eri tekijöiden ( $U$ -arvon,  $g_w$ -arvon, pinta-alojen eri ilmansuuntien kesken ja varjostuksien) vaikutuksien E-lukuun selvittämiseksi tarvit-

taisiin paljon yksityiskohtaisia simulointeja, jotta jokaisen tekijän yksittäinen vaikutus saataisiin selvitettyä tarkasti. Koska auringon säteilyenergian tiedetään kohdistuvan enemmän etelän ja lännen puoleisille julkisivuille, olisi järkevää suunnitella rakennuksen eri julkisivuille ominaisuuksiltaan erilaisia ikkunoita.

Parvekelasituksia koskevien simulointien tulosten perusteella (kuva 15 ja liite 6) parvekelasin ST-arvon pienentäminen kasvattaa rakennuksen E-lukua. Vaikutus on kuitenkin hyvin pieni. Ikkunoiden pinta-alojen vaikutusta etelän ja lännen puoleisilla julkisivuilla pienensi parvekkeiden aiheuttama varjostus. Myös parvekelasien kohdalla parvekkeen syvyys pienentää parvekelasin vaikutusta. Simulointien tulosten perusteella rakennuksen E-luku riippuu parvekelasin ST-arvosta lineaarisesti. Vaikutuksen suuruus riippuu kuvan 15 mukaisesti siitä, mille julkisivulle parveke on sijoitettu.

Simuloinnissa käytetyn perusmallin ikkunoiden  $g_w$ -arvo on 31 %. Jos parvekkeisiin lisätään lasitukset, joiden ST-arvo on 80 %, tarkoittaa tämä sitä, että koko säteilyenergianmäärästä pääsee tilaan 24,8 %. Jos edellä mainittua tilannetta verrataan toiseen tilanteeseen, jossa ikkunan  $g_w$ -arvo olisi saman 31 % ja ei käytettäisi parvekelasituksia ollenkaan (vastaa tuloksissa parvekelasin ST-arvoa 100 %), pääsee asuntoon 31 % auringon säteilyenergiasta. Tämä noin 6 % muutos auringonsäteilyenergian pääsyssä rakennukseen ei vaikuta rakennuksen E-lukuun liitteen 6 mukaisesti kuin kahdella kymmenyksellä.

Täten voidaan päätellä, että kahden metrin parvekkeet ja simuloinneissa käytetyt sälekaihtimet varjostavat tiloja niin merkittävästi, että ikkunoista ei pääse juurikaan säteilyä huoneeseen. Tämä käy selville myös RIUSKA:sta saatavasta tilakohtaisista lämpökuormakuvaajista. Tilan 245 lämpökuormat 15. päivä heinäkuuta on esitetty kuvassa 32. Kuvasta 32 voidaan havaita, että tilan lämpökuormat koostuvat pääasiassa valaistuksesta, ihmisistä ja kuluttajalaitteista, eikä juurikaan ikkunoiden kautta tulevasta säteilystä.

Tällöin parvekelaseilla ei juurikaan voida pienentää auringosta saatavaa säteilyenergiaa, jos sen määrä on jo entuudestaan pieni. Täten parvekelasituksilla ei ole juurikaan vaikutusta tilojen lämmitystarpeeseen ja rakennuksen E-lukuun.

Kuten aiemmin on todettu, eri tilojen keskeinen vertailu yllälämpenemisen suhteen ei ole järkevää, mutta tulosten perusteella (kuva 16) voidaan yleisesti todeta, että parvekelasitus pienentää tilan astetuntilukua. Yksittäisen tilan astetuntiluku voi olla hyvinkin voimakkaasti riippuvainen parvekelasien käytöstä. Parvekelasien vaikutus eri tilojen astetuntilukuihin ja rakennuksen E-lukuun riippuu parvekelasin ST-arvon lisäksi muun muassa parvekkeen koosta, käytettävistä kaihtimista, ikkunan  $g_w$ -arvosta, ikkunan koosta, parvekkeen ilmansuunnasta, tilan rakenteista ja sisäisistä lämpökuormista. Täten parvekelasin yksiselitteistä vaikutusta on vaikea määrittää.

Tulosten perusteella parvekelasituksen käyttäminen (ja lasituksen ST-arvon pienentäminen) laskee astetuntilukua, mutta nostaa E-lukua. Toisin sanoen saatava hyöty E-luvussa tarkoittaa astetuntiluvun heikkenemistä ja päinvastoin.

### 5.3 Ilmanvaihtojärjestelmä

Puhaltimien ominaissähkötehoa koskevien simulointien tulosten (kuva 19) perusteella puhaltimien SFP-lukujen vaikutus rakennuksen E-lukuun on selvä. Tämä johtuu osaksi puhaltimien käyttämän sähköenergian suuresta energiamuotokertoimesta (1,7), joka on esimerkiksi lämmityksessä käytetyn kaukolämmön energiamuotokertoimeen (0,7) verrattuna suuri.

E-luku riippuu puhaltimen SFP-luvuista lineaarisesti.  $0,2 \text{ kW}/(\text{m}^3/\text{s})$  muutos kaikkien rakennuksen puhaltimien SFP-luvuissa tarkoittaa näillä lähtötiedoilla simuloitaessa  $3 \text{ kWh}/\text{m}^2$ ,a muutosta E-luvussa, joka vastaa 2,3 % osuutta E-luvusta. E-lukulaskennassa sellaisten puhaltimien SFP-luvuilla on suurin merkitys rakennuksen E-lukuun, joiden ilmavirta on suurin.

Puhaltimien SFP-luvun pienentäminen on hyvä keino alentaa rakennuksen E-lukua, koska sen vaikutus E-lukuun on selvästi huomattavissa, eikä se vaikuta rakennuksen yllälämpenemiseen (astetuntilukuun).

Ilmanvaihdon lämmöntalteenottoa koskevien tulosten (kuva 20) perusteella lämmöntalteenoton tuloilman lämpötilasuhteella on merkittävä vaikutus rakennuksen E-lukuun. Lämmöntalteenoton vaikutus rakennuksen E-lukuun riippuu lämmöntalteenoton tuloilman lämpötilasuhteen lisäksi lämmöntalteenottolaitteen tyypistä, koska



regeneratiivisella lämmönsiirtimellä päästään pienempään jäteilman lämpötilaan ilman lämmöntalteenoton jäätymisvaaraa. Koska nykyään sekä pyörivällä lämmönsiirtimellä että levylämmönsiirtimellä päästään lähes samoihin tuloilman lämpötilasuhteen arvoihin, olennainen vaikutus on sillä, kuinka alhaisessa lämpötilassa lämmöntalteenotto-laite on varmennettu toimimaan. Nestekiertoisen lämmöntalteenottolaitteen lämpötilasuhte on alhaisempi, kuin edellä mainituilla lämmöntalteenottotavoilla.

Rakennuksen E-luku on pienillä lämpötilasuhteilla lähes sama regeneratiivisella ja rekuperatiivisella lämmöntalteenotolla, mutta korkeilla lämpötilasuhteen arvoilla jäteilman lämpötilarajoituksesta johtuva ero kasvaa regeneratiivisen lämmönsiirtimeen eduksi. Lisäksi valmistajat lupaavat regeneratiivisille lämmönsiirtimille hieman korkeampia lämpötilasuhteen arvoja verrattuna levylämmönsiirtimeen. Tämän takia on perusteltua käyttää aina regeneratiivista lämmönsiirrintä, kun se vain on mahdollista.

Kuten puhaltimien ominaissähkötehon kohdalla, myös lämmöntalteenoton lämpötilasuhteen kohdalla sellaisten koneiden lämpötilasuhteiden muutoksella on eniten vaikutusta rakennuksen E-lukuun, joiden ilmavirrat ovat suurimmat. Rakennuksen E-luku riippuu lämmöntalteenoton tuloilman lämpötilasuhteesta kuvan 20 mukaisesti epälineaarisesti.

Myöskään lämmöntalteenoton tuloilman lämpötilasuhteen muutoksella, tai lämmöntalteenoton tyypillä ei ole vaikutusta tilojen asetuntilukuihin. Täten myös lämmöntalteenoton tehostus on hyvä keino parantaa rakennuksen E-lukua.

Ilmanjakotapaa tarkasteltaessa simuloinnit tehtiin pitämällä ilmanvaihdon puhaltimien ominaissähköteho ja lämmöntalteenottolaitteiden tuloilman lämpötilasuhte vakioina, koska nämä tekijät riippuvat merkittävästi järjestelmien mitoituksesta ja laitteiden valinnasta. Kuitenkin hajautettua ilmanvaihtojärjestelmää käytettäessä voidaan vaapammin käyttää regeneratiivista lämmöntalteenottoa, jos ilmanvaihtokoneiden palvelualueet on jaettu huoneistokohtaisesti [10, s.17]. Lisäksi hajautettua ilmanvaihtoa käytettäessä päästään helpommin korkeisiin lämmöntalteenoton lämpötilasuhteisiin [2].

Ilmanjakotapaa koskevien simulointien tulosten (kuva 21) perusteella voidaan todeta E-luvun pysyvän lähes samana hajautettua ja keskitettyä ilmanvaihtojärjestelmää käy-

tettäessä, jos kaikkien puhaltimien SFP-luku ja ilmanvaihdon lämmöntalteenottolaitteiden tuloilman lämpötilasuhde pysyy samana molemmissa järjestelmissä. Jos molemmissa järjestelmissä käytetään huonekohtaista ilmanvaihdon tehostusta, pysyy rakennuksen E-luku edelleen samana.

Hajautettu tai keskitetty huoneistokohtaisesti tehostettava ilmanvaihtojärjestelmä sen sijaan alentaa huomattavasti E-lukua verrattuna tilanteeseen, jossa ei käytetä huoneistokohtaista tehostusta. Hajautettua ilmanjakotapaa käytettäessä huoneistokohtainen tehostus on helppo toteuttaa, mutta se on mahdollista myös keskitettyä ilmanjakotapaa käytettäessä.

Huoneistokohtaisesti tehostettavan ilmanvaihtojärjestelmän käyttäminen on perusteltua myös sen takia, että se ei korota tilojen astetuntilukua, vaikka ominaistuloilmavirtaa voidaan pienentää. Tämä johtuu siitä, että yllälämpenemistarkastelu tehdään rakennuksen suunnitelluilla ilmavirroilla, joka tässä työssä oli makuu- ja olohuoneissa  $0,5 \text{ dm}^3/(\text{s}, \text{m}^2)$  eli Suomen rakennusmääräyskokoelman osan D2 [10] pintaalamääritelmän mukainen. Kyseinen ilmamäärä on sama kuin rakennuksen E-lukua laskettaessa rakennuksen standardikäytöllä.

Myös ilmanvaihtokonehuoneista luopumisella on alentava vaikutus rakennuksen E-lukuun. Simuloinneissa tilan 418 astetuntiluku nousi ilmanvaihtokonehuoneiden poistamisen myötä, koska osa tilan 418 yläpohjasta rajoittui ilmanvaihtokonehuoneen alueelle. Ilmanvaihtokonehuoneiden poistamisen myötä koko tilan 418 yläpohja rajoittuu ulkoilmaan, joten kesällä ulkoa pääsee johtumaan enemmän lämpöä kyseiseen tilaan. Ilmanvaihtokonehuoneista luopuminen aiheuttaa myös auringon säteilyenergian jakautumisen koko tilan 418 yläpohjan alueelle, joka osaltaan lämmittää tilaa enemmän ja täten nostaa astetuntilukua. Jos yllälämpenemistä olisi tutkittu jonkin toisen tilan osalta, jolla ei olisi ollut yhteistä tiloja erottavaa rakenneosaa ilmanvaihtokonehuoneiden kanssa, ei konehuoneista luopumisella olisi ollut vaikutusta tilan astetuntilukuun.

Täten rakennuksen E-lukua ja tilojen astetuntilukuja ajatellen kannattaa aina käyttää hajautettua ilmanvaihtojärjestelmää, jos se vain on mahdollista. Hajautetussa ilmanvaihtojärjestelmässä kuitenkin investointikustannukset ovat keskitettyä ilmanvaihtojärjestelmää suuremmat. Toisaalta ilmanvaihtokonehuoneista luopuminen pienentää rakennuskustannuksia, joka kompensoi kustannusten loppusummaa. Rakennusta

suunniteltaessa on otettava huomioon myös hajautetun ilmanvaihtojärjestelmän aiheuttamat suuremmat huoltokustannukset.

Lisäksi jos rakennuksen ylälämpenemistä ei pystytä hallitsemaan ainoastaan passiivisin keinoin, joudutaan rakennukseen asentamaan jäähdytysjärjestelmä. Tämä tarkoittaa hajautettua ilmanvaihtojärjestelmää käytettäessä myös laajan jäähdytysjärjestelmän rakentamista, joka osaltaan lisää investointikustannuksia. Keskitettyä ilmanvaihtojärjestelmää käytettäessä voidaan jäähdytystehontarpeesta riippuen selvittää vain muutamalla ilmanvaihtokoneen jäähdytyspatterilla.

#### **5.4 Valaistus ja aurinkoenergian käyttö**

Valaisimia koskevia simulointien tuloksia tutkittaessa (kuva 25 ja liite 13) voidaan todeta, että valaisinvaihtoehtoista halogeeni- tai hehkulamppuja käyttävät valaisimet nostavat rakennusten E-luvun niin korkeaksi Suomen rakennusmääräyskokoelman osan D5 [9] ohjeilla laskettaessa, että sen pienentäminen muilla keinoilla on haastavaa. LED- ja pienoisloistelamppuvalaisimia käytettäessä pysyy rakennuksen E-luku likimain yhtä suurena kuin rakennuksen standardikäytöllä laskettaessa. Täten ainoa valaisinmalli, jota voidaan käyttää rakennuksen E-luvun alentamiseen Suomen rakennusmääräyskokoelman osan D5 [9] ohjeiden mukaisesti, on loistelamppuvalaisin.

Jos valaisimien ominaissähköteho määritetään Suomen rakennusmääräyskokoelman osan D5 [9, s.29-30] avulla, voidaan valaisimien sähkönkulutukseen vaikuttaa tilojen valaistustason arvoja muuttamalla, valaistuksen ohjaustavalla, ympäristön siistiydellä ja valaistustavalla. Tässä insinööriyössä arvot on valittu keskinkertaiselle valaistusympäristölle ja valaistusta ohjataan käsikytkimellä. Järjestelmää voidaan ohjata myös esimerkiksi päivänvalosäätimellä tai läsnäolo-anturilla, jolloin valaisinjärjestelmän sähköenergiankulutus pienenee. Tämä tarkoittaa tämän insinööriyön tuloksista poiketen pienempää E-lukua sekä pienempiä astetuntilukuja. Jos tilojen valaistusta kuitenkin ohjataan huoneiden käsikytkimien avulla (kuten yleensä), on rakennuksen E-luvun pienentäminen haastavaa asuinkerrostalossa Suomen rakennusmääräyskokoelman osan D5 [9] ohjeilla.

Tämän insinööriyön laskelmien ja simulointien perusteella voidaan täten todeta, että asuinkerrostalon valaistukselle määritetty standardikäytön arvo  $11 \text{ W/m}^2$  yhdistettynä

standardikäytön mukaiseen valaistuksen käyttöaikaan ja käyttöasteeseen on niin hyvä yhdistelmä, ettei sitä pystytä paljoa Suomen rakennusmääräyskokoelman osan D5 [9] ohjeilla parantamaan, jos simuloitavana kohteena on asuinkerrostalo.

Jos valaistuksen ominaissähköteho määritetään Suomen rakennusmääräyskokoelman osan D5 [9] perusteella ja oletetaan valaistuksen käyttöajan painottuvan pimeään vuoden aikaan ja iltayöhön, laskevat tilojen astetuntiluvut merkittävästi. Syynä tähän on käyttöajan jakautuminen rakennuksen standardikäytöstä poiketen. Rakennuksen yllä lämpenemistä tutkitaan Suomen rakennusmääräyskokoelman osan D5 [9] mukaisesti 1.6 - 31.8 välisenä aikana. Jos valaistuksen käyttöaika jaetaan, kuten tässä insinöörityössä on jaettu, on valaistus päällä edellä mainittuna aikana vain 31,3 tuntia. Tämän takia myöskään valaistuksen aiheuttama lämpökuorma ei ole suuri. Täten jos valaistuksen ominaissähköteho määritetään edellä mainitulla tavalla, voidaan tilojen astetuntilukuja pienentää merkittävästi.

Tulokset herättävät kuitenkin hämmennystä, koska esimerkiksi LED-valaisimien ottotehon tiedetään olevan hyvin pieni. Täten voitaisiin olettaa LED-valaisimien alentavan rakennuksen E-lukua, mutta niin ei kuitenkaan Suomen rakennusmääräyskokoelman osan D5 [9] ohjeilla laskettuna ole käynyt. Kyseisessä rakennusmääräyskokoelman osassa ei kuitenkaan ole annettu ohjeita valaistuksen käyttöajan jakautumiselle, vaan valaistuksen käyttöajan on tässä insinöörityössä oletettu painottuvan pimeään vuoden aikaan. Täten virhemahdollisuus on laskennassa olemassa.

Valaistuksen ominaissähkötehon määrittämiseen on Suomen rakennusmääräyskokoelman osan D5 [9] ohjeiden lisäksi olemassa myös muita keinoja. Rakennuksen valaistussuunnittelun voi hoitaa sähkösuunnittelijan lisäksi joskus erillinen valaistus-suunnittelija, joka määrittää samalla valaistuksen ominaissähkötehon käyttäen Suomen rakennusmääräyskokoelman osasta D5 [9] poikkeavaa menetelmää. Tilojen valaistusta voidaan suunnitella myös Internetistä saatavien simulointiohjelmien avulla, jotka laskevat valaistuksen ominaissähkötehon poiketen Suomen rakennusmääräyskokoelman osan D5 [9] menetelmästä. Näillä keinoilla valaistuksen ominaissähkötehoa voidaan tiedettävästi alentaa ainakin arvoon  $7 \text{ W/m}^2$  toimistorakennuksessa [2, s.92].

$7 \text{ W/m}^2$  valaistuksen ominaissähköteho tarkoittaisi tässä insinöörityössä käytetyn asuinkerrostalon kohdalla E-luvun laskua arvosta  $130,2 \text{ kWh/m}^2\text{a}$  arvoon  $124,2$

kWh/m<sup>2</sup>a, joka vastaa 4,6 % laskua perusmallin E-luvusta. Koska rakennuksen E-luku riippuu valaistuksen ominaissähkötehosta lineaarisesti, voidaan todeta, että valaistuksen ominaissähkötehon alentaminen yhdellä watilla per neliö (1 W/m<sup>2</sup>) alentaa rakennuksen E-lukua 1,5 kWh/m<sup>2</sup>a, joka vastaa perusmallin E-luvusta 1,1 % osuutta.

Valaisimien ominaistehontarpeen lasku vaikuttaa E-luvun lisäksi alentavasti tilojen asetuntilukuihin, joten valaistuksen energiatarpeen pienentäminen on hyvä keino energiatehokkuuden parantamiseen. Perusmallin tapauksessa valaistuksen ominaissähkötehon laskeminen arvoon 7 W/m<sup>2</sup> tarkoittaa tilan 418 asetuntiluvun alentumista arvoon 94 °Ch.

Aurinkokeräimiä käsittelevien simulointien tulosten (kuva 23 ja liite 11) perusteella keräimien käytöllä on merkittävä vaikutus, paitsi rakennukseen ostettavaan käyttöveden lämmitysenergian määrään myös suuri vaikutus rakennuksen E-lukuun. Tähän vaikuttaa osaltaan käyttöveden lämmityksen suuri energiantarve (katso kuva 4). Tässä opinnäytetyössä tutkittiin käyttöveden lämmitysenergian kattamista aurinkokeräimillä aina 60 % vuotuisesta tarpeesta. 60 % kattaminen vuotuisesta käyttöveden energian tarpeesta tarkoittaisi aurinkokeräimien suurta pinta-alaa (satoja neliömetrejä) ja täten suuria investointikustannuksia. Tässä insinöörityössä käytetyn mallikerrostalon käyttöveden energiankulutuksen kattamiseksi 60 % aurinkokeräimien avulla tarvittaisiin satoja neliömetrejä aurinkokeräimiä.

Edellä mainittu 60 % osuus käyttöveden lämmittämisestä aurinkoenergialla kaukolämmön sijasta alentaa E-lukua tässä insinöörityössä käytetyssä perusmallin tapauksessa arvosta 130,2 kWh/m<sup>2</sup>a arvoon 113,4 kWh/m<sup>2</sup>a. Koska E-luku riippuu aurinkokeräimillä lämmitettävän käyttöveden osuudesta lineaarisesti, alentaa 10 % käyttöveden lämmittäminen aurinkokeräimillä E-lukua 2,1 % eli huomattavasti. Lisäksi käyttöveden lämmittäminen aurinkokeräimillä on hyvä keino alentaa E-lukua, koska se ei vaikuta rakennuksen ylläpölymiseen.

Aurinkopaneeleita käytettäessä paneeleista saatava sähköenergia voidaan jakaa moneen käyttökohteeseen. Yleensä aurinkopaneeleilla tuotetaan sähköenergiaa kiinteistön LVI-laitteille, valaistus ja kuluttajalaitteille sekä koko rakennuksen sähkölaitteille. Nämä ryhmät ovat käytännössä helppoja toteuttaa, koska kuluttajalaitteiden ja valaistuksen sähköjärjestelmä suunnitellaan yleensä omaan sähköryhmäänsä, LVI-

laitesähkö omaan ryhmäänsä ja koko rakennuksen sähköverkko sisältää nämä kaksi ryhmää.

Aurinkopaneeleita koskevien simulointien perusteella (kuva 24 ja liite 11) voidaan todeta, että paneeleilla voidaan alentaa rakennuksen sähköenergiankulutusta ja E-lukua tutkituista tekijöistä eniten. Paneeleista saatavan sähköenergian määrä riippuu oleellisesti paneelien pinta-alasta. Lisäksi aurinkosähköjärjestelmään vaikuttaa moni muu seikka, joita on käsitelty luvussa 4.9.

Tätä insinööriötä tehtäessä Suomen rakennusmääräyskokoelman osasta D5 on käytössä luonnos [9] myöhemmin julkaistavasta, voimaan tulevasta rakennusmääräyskokoelman osasta. Käytettävissä oleva luonnos on paneelien sähköenergian tuoton osalta puutteellinen, eikä sen avulla täten voida laskea aurinkopaneeleista saatavaa vuotuista sähköenergian määrää. Aurinkopaneelien vuotuisen sähköenergian laskennan ja järjestelmän suunnittelun kohdalla kannattaa kääntyä sähkösuunnittelijan ja laitevalmistajien puoleen.

Kuten aiemmin on mainittu, aurinkokeräimillä ja -paneeleilla ei voida kattaa järjestelmien vuotuista energiantarvetta kokonaisuudessaan. Aurinkokeräimistä saatava energian määrä on korkeintaan 60 % energiankäyttökohteen energiankulutuksesta [3]. Saatavan energian määrää rajoittaa Suomessa auringon heikko säteily talviaikaan [3].

Myös aurinkopaneeleilla saatavan sähköenergianmäärän enimmäisosuus on rajallinen. Jos aurinkopaneeleilla saataisiin tuotettua 60 % koko rakennuksen vuotuisesta sähköenergian kulutuksesta, vastaisi tämä 106,4 MWh aurinkopaneelien sähköenergian tuottoa vuodessa, E-luvun ollessa tällöin simulointien tulosten perusteella 89,3 kWh/m<sup>2</sup>a. Tämä vastaa 886,6 m<sup>2</sup> aurinkopaneelien pinta-alaa, jos vuodessa saatavan energian määrä on 120 kWh jokaista aurinkopaneelin neliometriä kohti. Täten paneeleissa piilee merkittävä potentiaali E-luvun alentamiseksi. Näin isoon aurinkopaneelijärjestelmään investoiminen ei tosin ole kovin taloudellista.

Koska aurinkopaneeleista saatava vuotuinen sähköenergiamäärä on 120 kWh jokaista keräinneliötä kohden ja rakennuksen E-luku riippuu aurinkopaneelien energian tuotosta kuvan 24 mukaisesti lineaarisesti, voidaan rakennuksen E-lukua tarkastella myös paneelien pinta-alasta riippuvaisena [16]. Vastaavasti aurinkokeräimistä saatava

vuotuinen lämpöenergiämäärä on 250 - 400 kWh jokaista keräinneliötä kohden ja rakennuksen E-luku riippuu keräimien energiantuotosta kuvan 23 mukaisesti lineaarisesti, joten E-lukua voidaan tarkastella myös aurinkokeräimien pinta-alasta riippuvaisena [16].

Jos oletetaan, että keräimien energiantuotto on 300 kWh/a ja paneelien 120 kWh/a, saadaan simulointien tulosten perusteella laskettua, että 10 neliömetrin aurinkokeräinjärjestelmä alentaa E-lukua 0,46 kWh/m<sup>2</sup>a riippumatta siitä, mihin energiaa käytetään. Myös 10 neliömetrin aurinkokeräinjärjestelmä alentaa rakennuksen E-lukua likimain saman verran. Eri järjestelmien yhtä suuri vaikutus rakennuksen E-lukuun selittyy sillä, että vaikka paneeleista ja keräimistä saatava energiamäärä on eri, eroavat myös kaukolämmön ja sähkön energiamuotokertoimet toisistaan, jolloin erot kompensoivat toisiaan.

Tulee myös huomata, että aurinkopaneelit ja -keräimet ovat hyvä keino rakennuksen E-luvun alentamiseen paitsi suuren potentiaalinsa takia, myös sen takia, ettei niillä ole vaikutusta rakennuksen yllämpenemiseen.

## 6 MUUT AIHETTA KOSKEVAT TUTKIMUKSET

Rakennusten energiatehokkuudesta on tehty paljon tutkimuksia, mutta säännöllisesti uudistuvien Suomen rakennusmääräyskokoelman osien johdosta kaksikin vuotta vanha tutkimus ei välttämättä ole enää ajankohtainen, eikä sen tietoja voi täysin luotettavasti rinnastaa nykypäivään. Lisäksi rakennusten E-luvun laskenta on tätä insinöörityötä tehtäessä vielä suhteellisen uusi asia, eikä E-luvun parantamisesta ole vielä tehty paljon tutkimuksia. Tässä luvussa on käsitelty Jarek Kurnitskin kirjaa "Energiamääräykset 2012 Opas uudisrakennusten energiamääräysten soveltamiseen" [2], jossa Kurnitski on tutkinut muun muassa asuinkerrostalon E-lukua ja siihen vaikuttavia tekijöitä. Tässä luvussa on kerrottu myös mahdollisista jatkotutkimusmahdollisuuksista

Kurnitskin kirjan tuloksia voidaan verrata tämän insinöörityön tuloksiin ja täten arvioida tuloksien luotettavuutta. Yleisesti ottaen voidaan todeta, että Kurnitski on tullut hyvin samoihin tuloksiin kuin tämän insinöörityön tulokset, joten tuloksia voidaan pitää luotettavina. Tuloksissa on kuitenkin eroavaisuutta ikkunoiden pinta-alaa koskien.

Kurnitskin mukaan asuinkerrostalo omaa tyypillisesti hyvän kompaktisuuden, eli rakennusvaipan pinta-ala on pieni suhteessa rakennuksen lattiapinta-alaan. Tämä tarkoittaa sitä, että rakennuksen vaipan johtumislämpöhäviöiden määrä on pieni verrattuna muihin tekijöihin, kuten valaistuksen sähköenergian tarpeeseen tai jäähdytysenergian tarpeeseen. Pientalossa vaipan johtumislämpöhäviöt sen sijaan korostuvat. [2.]

Kerrostaloissa korostuu hyvä lämmöntalteenoton tehokkuus. Hajautetulla ilmanvaihtojärjestelmällä päästään alhaisempiin SFP-lukuihin ja parempaan lämmöntalteenoton tehokkuuteen. Rakennuksen vaipan osalta kerrostalon ikkunoilla on suuri merkitys, koska niiden pinta-ala suhteessa muun vaipan pinta-alaan on suuri verrattuna esimerkiksi pientaloon. Lisäksi käyttöveden lämmitys muodostaa suuren osan kerrostalon lämmitysenergiasta. Rakennukseen ostettavaa käyttöveden lämmityksen energian määrää voidaan pienentää huomattavasti aurinkokeräimiä käyttämällä, jolloin myös E-luku laskee merkittävästi. Myös aurinkopaneelien hyödyntäminen omaa merkittävän potentiaalin E-luvun alentamiseen, mutta asuinkerrostalossa rajoittavaksi tekijäksi muodostuu aurinkopaneelien ja -keräimien tilantarve. [2]

Kurnitski kertoo teoksessaan ikkunoiden koon ja auringonsuojauksen vaikuttavan kaikilla rakennusluokilla olennaisesti rakennuksen ylikuumenemiseen sekä E-lukuun [2]. Tämän insinööritöön tulosten perusteella ikkunoiden pinta-alalla ei kuitenkaan ole järin suurta vaikutusta rakennuksen E-lukuun. On huomattava, että tämän insinööritöön simuloinnit tehtiin ikkunoiden  $g_w$ -arvolla 31 % ja U-arvolla  $1,02 \text{ W/m}^2\text{K}$ . Kuten aiemmin on mainittu, ikkunoiden pinta-alan vaikutus rakennuksen E-lukuun ja tilojen astetuntilukuihin olisi ollut suurempi, jos ikkunoiden  $g_w$ -arvo olisi simuloinneissa ollut korkeampi ja etelän ja lännen puoleisia julkisivuja ei olisi varjostettu parvekkeilla ja sälekaihtimilla.

Kurnitskin mukaan Suomen rakennusmääräyskokoelman osan D3 [1] määrittämä astetuntiraja  $150 \text{ }^\circ\text{Ch}$  asuinrakennusten jäähdytysrajalla  $27 \text{ }^\circ\text{C}$  laskettuna pystytään yleensä alittamaan passiivisin keinoin. Jos sisäilmaston laatutaso halutaan nostaa hyvälle tasolle ( $25 \text{ }^\circ\text{C}$ ), tarvitsee rakennukseen asentaa jäähdytysjärjestelmä. Kuitenkin passiivisten auringonsuojauskeinojen käyttäminen on hyödyllistä, vaikka astetuntilukua ei saataisikaan laskettua alle  $150 \text{ }^\circ\text{Ch}$ . Passiivisia auringonsuojauskeinoja käytettäessä laskee jäähdytysjärjestelmän energiantarve ja täten rakennuksen E-luku. [2.]



Kurnitski on teoksessaan [2] tutkinut rakennuksen vaipan ja ilmanvaihdon vaikutusta asuinkerrostalon E-lukuun. Kuvassa 33 on esitetty rakennuksen vaipan erilaiset ratkaisut, joilla Kurnitski on tutkimuksen tehnyt. Ilmanvaihdon puhaltimien ominaissähköteho ja ilmavirta on tutkimuksessa pidetty vakiona.

	Vertailuarvoilla	Parannettu	Passiivi
US, W/(m <sup>2</sup> K)	0,17	0,14	0,10
YP, W/(m <sup>2</sup> K)	0,09	0,09	0,06
AP, W/(m <sup>2</sup> K)	0,17	0,09	0,06
IKK, W/(m <sup>2</sup> K)	1,0	0,8	0,7
IKK, g-arvo	0,55	0,50	0,46
q <sub>50</sub> , m <sup>3</sup> /(h m <sup>2</sup> )	2,0	1,0	0,6
ominaislämpövähti, W/(K m <sup>2</sup> )	0,43	0,32	0,23
ilmanvaihto, l/(s m <sup>2</sup> )	0,4	0,4	0,4
ilmanvaihto, SFP, kW/(m <sup>3</sup> /s)	1,5	1,5	1,5

### KUVA 33. Kurnitskin tutkimuksen kerrostalon vaipan ominaisuudet [2]

Kuvassa 34 on esitetty, mihin tuloksiin Kurnitski on päässyt kerrostalorakennuksen vaipan ominaisuuksia tutkiessaan. Ilmanvaihdon lämmityksen nettotarve on laskettu lämmöntalteenoton 80 % lämpötilasuhteella. Kun lämpötilasuhte on 60 %, on ilmanvaihdon lämmityksen nettotarve 16,3 kWh/m<sup>2</sup>,a.

	Energian nettotarve, kWh/(m <sup>2</sup> a)			Energiankulutus, kWh/(m <sup>2</sup> a)			
	Vertailuarvoilla	Parannettu	Passiivi	Vertailuarvoilla, LTO 60 %	Vertailuarvoilla, LTO 80 %	Parannettu LTO 80 %	Passiivi LTO 80 %
Tilojen lämmitys	21,9	13,0	7,5	26,6	26,6	15,8	9,1
Ilmanvaihdon lämmitys	6,0	6,0	6,0	16,8	6,2	6,2	6,2
Lämpimän käyttöveden lämmitys	35,0	35,0	35,0	41,1	41,1	39,6	39,6
Jäähdytys	8,6	9,9	11,3	3,4	3,4	4,0	4,5
Puhaltimet ja pumput	7,3	7,3	7,3	7,3	7,3	7,3	7,3
Valaistus	9,6	9,6	9,6	9,6	9,6	9,6	9,6
Kulutajalaitteet	21,0	21,0	21,0	21,0	21,0	21,0	21,0
Nettotarve/ostoenergia yhteensä	109	102	98	126	115	103	97
<b>E-luku</b>				<b>129</b>	<b>122</b>	<b>114</b>	<b>111</b>

### KUVA 34. Kurnitskin tutkimuksen kerrostalon energiatulokset [2]

Kuvasta 34 havaitaan, että lämmöntalteenoton tuloilman lämpötilasuhdetta nostettaessa 60 %:sta 80 %:iin laskee rakennuksen E-luku vertailuarvoilla laskettuna 7 kWh/m<sup>2</sup>,a. Kirjassa [2] ei kerrota, onko laskennassa käytetty lämmöntalteenottoa regeneratiivista vai rekuperatiivista lämmöntalteenottoa. Tämän insinööritöön tulosten perusteella vastaava parannus regeneratiivisella lämmönsiirtimellä on 7,8 kWh/m<sup>2</sup>,a ja

rekuperatiivisella lämmönsiirtimellä 5,2 kWh/m<sup>2</sup>a eli samaa luokkaa. Kuvan 34 perusteella myös vaipan U-arvoilla ja ilmanpitävyydellä on huomattava vaikutus rakennuksen E-lukuun, kuten myös tästä insinööriyöstäkin käy ilmi. On huomattava, että tässä insinööriyössä käytetty perusmalli poikkeaa Kurnitskin käyttämästä mallista monen seikan kohdalla, mutta tulokset ovat silti samansuuruisia.

Koska rakennuksen E-lukuun vaikuttavia tekijöitä on lukuisia, riittää E-lukuun vaikuttavissa tekijöissä tutkimista tulevaisuudessakin. Tämän insinööriyön tulokset perustuvat vain tässä insinööriyössä käytettyyn rakennukseen ja sen teknisiin järjestelmiin. Täten voitaisiin jatkotutkimuksilla vertailla, päästäänkö saman käyttötarkoitukseluokan rakennuksessa samansuuruisiin tuloksiin, jos käytetään mallina eri kerrostaloa, jossa on erilaiset tekniset järjestelmät.

Myös vertailu eri käyttötarkoitukseluokkien välillä olisi hyvä tutkimisen kohde. Jatkotutkimuksissa voitaisiin tutkia eri käyttötarkoitukseluokille ominaisia tekijöitä, eli mitkä tekijät korostuvat esimerkiksi toimistossa tai pientalossa. Jos ajatellaan tilannetta yleisesti, voidaan olettaa pientalossa korostuvan rakennuksen vaipan ominaisuuksien, koska pientalon lattiapinta-ala on pieni verrattuna vaipan pinta-alaan. Kaikissa muissa kuin käyttötarkoitukseluokan 1 ja 2 rakennuksissa korostuu ilmanvaihdon eri tekijöiden vaikutus, koska standardikäytön mukainen ilmavirta on näissä käyttötarkoitukseluokissa huomattavasti luokkia 1 ja 2 suurempi. Rakennuksien käyttötarkoitukseluokat on eritelty Suomen rakennusmääräyskokoelman osassa D3 [9, s.9].

Rakennuksen E-luku riippuu oleellisesti lämmitystavasta, koska eri energiamuodoilla on eri energiamuotokertoimet. Täten mielenkiintoinen tutkimusaihe olisi selvittää, mitä lämmitysjärjestelmää kannattaa käyttää milloinkin. Myös rakennuksen lämmityksen nettoalan määrän vaikutusta rakennuksen E-lukuun voitaisiin tutkia ja selvittää, millä tekijöillä on suurempi vaikutus pienessä rakennuksessa ja vastaavasti pienemmissä. Rakennusten rakenteellisia ja taloteknisiä ominaisuuksia voitaisiin tutkia myös keskittymällä E-luvun sijasta tilojen ylälämpenemiseen ja astetuntilukuihin.

Varteenotettavia yksittäisiä tutkimuskohteita ovat esimerkiksi järjestelmähäviöt ja niiden vaikutukset E-lukuun. Suomen rakennusmääräyskokoelman osan D5 [9] mukaan E-lukulaskennassa ilmanvaihdolla ei ole järjestelmähäviöitä, mutta tilojen lämmityksen ja käyttöveden lämmityksen kohdalla E-luku riippuu putkien lämpöhäviöistä

ja varaajien lämpöhäviöstä. Käyttöveden kohdalla E-luku riippuu lisäksi lämpimän käyttöveden kiertojohdon lämpöhäviöistä ja käyttövesipattereiden energiankulutuksesta. Tätä insinöörityötä tehtäessä huomattiin lämpimän käyttöveden kiertojohdon eristystasolla ja käyttövesipattereiden lukumäärällä olevan merkillisen suuret vaikutukset rakennuksen E-lukuun. Täten näiden tekijöiden vaikutuksia rakennuksen E-lukuun voitaisiin tutkia tarkemmin.

Tätä insinöörityötä tehtäessä huomattiin myös, että rakennuksen E-luku ja tilojen astetuntiluvut riippuvat oleellisesti ikkunoista ja niihin liittyvistä tekijöistä. Ikkunoiden vaikutus rakennuksen E-lukuun ja tilojen astetuntilukuihin pohjautuu ikkunan U-arvoon,  $g_w$ -arvoon,  $g_g$ -arvoon, ST-arvoon, ikkunoiden pinta-aloihin eri ilmansuuntien kesken sekä ikkunoiden varjostuksiin. Näistä saatavia erilaisia yhdistelmiä on lukuisia ja selvittävää riittää varmasti yhden opinnäytetyön verran. Tämän insinöörityön perusmallissa on käytetty ikkunoiden U-arvona  $1,02 \text{ W/m}^2\text{K}$  ja  $g_w$ -arvona 31 %. Vertailuksi olisi ollut mielenkiintoista selvittää, miten tulokset muuttuvat, jos ikkunoiden  $g_w$ -arvo olisi ollut suurempi.

Näiden tekijöiden lisäksi voitaisiin tutkia esimerkiksi ilmanvaihdon ja valaistuksen tarpeenmukaisen ohjauksen vaikutusta rakennuksen E-lukuun ja tilojen astetuntilukuihin. Tarpeenmukaista hiilidioksidipitoisuuden mukaan säätyvää ilmanvaihtoa tutkittaessa ei kuitenkaan voida käyttää RIUSKA-simulointiohjelmaa, koska tällä hetkellä markkinoilla olevassa ohjelmaversiossa 4.8.14 ei ole valmiuksia hiilidioksidipitoisuuden mukaisesti ohjatun ilmanvaihdon simuloimiseksi. Hiilidioksidipitoisuuden mukaisesti säädettävän ilmanvaihdon käyttämistä voidaan kuitenkin simuloida esimerkiksi IDA ICE-ohjelmalla.

Ilmanvaihtoa voitaisiin tutkia myös läsnäolo-ohjauksen mukaisesti ohjattuna, jota myös tässä insinöörityössä suunniteltiin. Läsnäolo-ohjauksen huomioimiseksi E-lukulaskennassa ei kuitenkaan ole Suomen rakennusmääräyskokoelman osassa D3 [1] yksiselitteisiä ohjeita. Ilmanvaihdon tarpeenmukaisesta ohjauksesta on säädetty Suomen rakennusmääräyskokoelman osassa D3 seuraavasti:

"3.2.4 Tarpeenmukaisella ilmanvaihdolla varustetuissa tiloissa käytetään kokonaisenergiankulutuksen laskennassa ilmamäärien suunnitteluarvoja ja taulukon 3 mukaisia käyttöaikoja." [1.]

Suomen rakennusmääräyskokoelman osan D3 [1] taulukossa 3 on annettu ilmanvaihdon käyttöajat. Esimerkiksi asuinkerrostaloissa ilmanvaihdon tulee olla päällä 24 tuntia päivässä viikon jokaisena päivänä. Ilmavirtojen kohdalla tulee käyttää suunniteltuja ilmamääriä, jotka siis poikkeavat rakennuksen standardikäytön asettamasta arvosta. Suomen rakennusmääräyskokoelman osan D2 [10] mukaisesti huoneistokohtaisia ilmamääriä voidaan käyttöajan ulkopuolella alentaa 60 % käyttöajanmukaisista ilmamääristä, jolloin ilmanvaihdon puhallinsähkön sekä ilmanvaihdon lämmityksen määrä pienenee. Tämä taas johtaa matalampaan E-lukuun, mutta korkeampiin tilojen astetuntilukuihin. On tosin myös mahdollista, että ilmanvaihdon ilmavirta kasvaa standardikäytön mukaisesta arvosta niin paljon, että läsnäolo-ohjattu järjestelmä nostaa rakennuksen E-lukua.

Läsnäolo-ohjattua ilmanvaihtoa käytettäessä ongelmaksi muodostuu se, ettei Suomen rakennusmääräyskokoelmassa ole kerrottu, kuinka kauan ihmiset viettävät aikaa eri asunnoissa. Asunnoille tulisi luoda käyttöprofiilit läsnäolo-ohjauksen käyttämiseksi. Ihmisten läsnäoloa voitaisiin päätellä Suomen rakennusmääräyskokoelman osassa D3 esitetyn taulukon 3 rakennuskohtaisesta käyttöasteesta. Toinen mahdollinen keino ilmanvaihdon käyttöprofiilien selvittämiseksi olisi tutkia VTT:n luomia ilmanvaihtokoneiden sertifikaatteja ja luoda käyttöajat niiden perusteella. Näissä sertifikaateissa VTT on testannut ilmanvaihtokoneita tietyillä puhallinnopeuksilla, tietyn ajan päivässä ja ilmoittanut näillä käyttöajoilla mitatut ilmanvaihtokoneiden varmennetut suoritusarvot.

Kuten aiemmin on mainittu, rakennusten ylälämpeneminen tulee ehkäistä ensisijaisesti passiivisin keinoin, mutta tämä ei aina ole mahdollista [1]. Erilaisten jäähdytysjärjestelmien käytön vaikutus E-lukuun olisi täten myös yksi potentiaalinen selvittämisen aihe. Tässä insinööriyössä käytettyyn perusmalliin ei kuulunut jäähdytysjärjestelmää.

## 7 YHTEENVETO

Uuden E-lukulaskennan myötä rakennuksen energiatehokkaaseen suunnitteluun ja rakentamiseen tulee kiinnittää entistä enemmän huomiota. Koska rakennuksen E-luku muodostuu rakennuksen järjestelmien yhteenlasketusta energiantarpeesta, on E-lukua parannettaessa tehostettava yleensä useampaa osatekijää halutun E-luvun tai energialuokan saavuttamiseksi. Tämä tarkoittaa entistä tiiviimpää yhteistyötä eri suunnitteli-

joiden kesken. Kun rakennuksen E-lukua parannetaan, ovat käytössä seuraavat keskeiset keinot:

- Järjestelmien energiatarpeiden pienentäminen
- Järjestelmähäviöiden pienentäminen
- Järjestelmien tarpeenmukainen ohjaus
- Energian tuottaminen rakennuksen omalla tontilla
- Lämmitysenergiamuodon valinta.

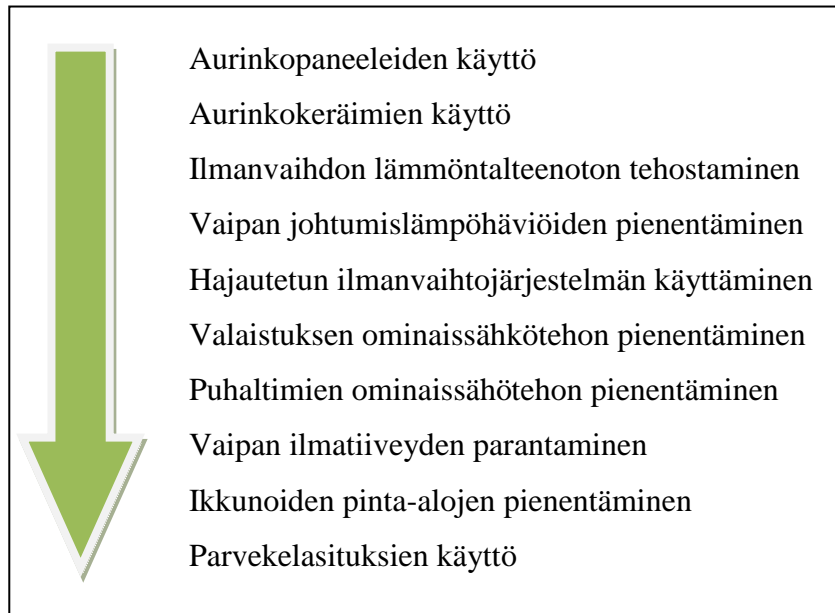
Tässä insinööriyössä on tutkittu yhteensä yhdeksää eri E-lukuun vaikuttavaa osatekijää ja näiden tekijöiden yhteisvaikutuksia rakennuksen E-lukuun. Näiden eri tekijöiden vaikutusten suuruuksien vertaileminen keskenään ei ole kovin tasa-arvoista, koska toisien tekijöiden parantaminen voi olla taloudellisesti paljon kalliimpaa kuin toisien ja kaikkien tekijöiden toteuttaminen samaan rakennukseen voi olla myös rakennusteknisesti mahdotonta. Hyvän energiatehokkuuden saavuttaminen edellyttää eri järjestelmien ja rakenteiden normaalia energiatehokkaampaa mitoitusta, joka ei myöskään aina rakennusteknisesti tai taloudellisesti ole mahdollista. Lisäksi toisilla tekijöillä on alentava vaikutus tilojen astetuntilukuihin ja toisilla tekijöillä vastaavasti nostava.

Ei myöskään voida olettaa, että vaikutusten suuruus on samanlainen kaikissa kaukolämpöön liitetyissä kerrostalorakennuksissa. Kuten aiemmin on mainittu, tämän insinööriyön tulokset ovat täysin luotettavia vain tässä insinööriyössä käytetyllä perusmallilla simuloitaessa, joka sisältää rakennuksen geometriamallin lisäksi tiedot eri teknisistä järjestelmistä. Erilaiset rakennukset ja järjestelmät vaikuttavat tuloksiin.

Jos kuitenkin yhteismitallistetaan tässä insinööriyössä tutkitut tekijät, voidaan eri tekijöiden vaikutuksia perusmallin E-lukuun vertailla keskenään. Tämä edellyttää, että järjestelmät mitoitetaan vastaamaan huippuenergiatehokkaan rakennuksen tasoa ja mahdollisimman alhaista E-lukua. Oletetaan kaikkien tekijöiden olevan mahdollista toteuttaa rakennusteknisesti ja taloudellisesti, eikä oteta rakennuksen ylläpölyä huomioon.

Jos edellä mainitut seikat toteutuvat voidaan todeta, että parannettaessa perusmallin E-lukua normitasosta kohti huippuenergiatehokasta tasoa on tutkituista tekijöistä suurimmat vaikutukset aurinkopaneelien ja aurinkokeräimien käytöllä. Suuret vaikutukset

tukset ovat lisäksi rakennuksen vaipan lämmönjohtavuuden alentamisella ja lämmöntalteenoton hyötysuhteella. Tutkituista tekijöistä pienimmät vaikutukset tässä insinöörityössä käytetyn perusmallin E-lukuun ovat parvekelasituksilla ja ikkunoiden pinta-aloilla. Jos edellisessä kappaleessa mainitut seikat toteutuvat, on tässä työssä tutkittujen, E-lukuun vaikuttavien tekijöiden vaikutuksien suuruusjärjestys kuvan 35 mukainen (suurimmasta pienimpään):



**KUVA 35. Tässä insinöörityössä tutkittujen E-lukuun vaikuttavien tekijöiden vaikutuksien suuruusjärjestys (suurimmasta pienimpään)**

Jos taas tutkitaan, mitä tekijöitä kannattaa parantaa, jottei rakennuksen tiloihin aiheudu ylikuumenemisoongelmaa, on rakennuksen E-lukuun edelleen suurin vaikutus aurinkopaneelien ja -keräimien käytöllä. Kannattavia ovat myös ilmanvaihdon lämmöntalteenoton tehostaminen ja valaistuksen ominaissähkötehon alentaminen.

Ei tule kuitenkaan unohtaa myöskään puhaltimien ominaissähkötehon ja ilmanvaihdon järjestelmätyypin vaikutusta. Ilmanvaihdon lämmöntalteenoton tehokkuuden parantaminen ja puhaltimien ominaissähkötehon pienentäminen ovat oletettavasti kustannuksiltaan kannattavimpia ratkaisuja E-luvun alentamiseksi, ja niiden avulla saavutetaan selvä parannus rakennuksen E-lukuun.

Tutkituista tekijöistä suurimman ylikuumenemisoingelman aiheuttavat rakennuksen vaipan U-arvot, joista ikkunat pahimpana yksittäisenä tekijänä. Tämän insinöörityön perusteella puukerrostalossa muodostuu helposti ylikuumenemisoingelma, koska puu-

kerrostalossa ei ole yhtä paljoa eristeen sisäpuolista lämpökapasiteettia tasaamassa lämpövaihteluita, kuin betonikerrostalossa. Tutkituista tekijöistä toiseksi pahimman riskin rakennuksen yllälämpenemiselle aiheuttaa ilmatiivis rakentaminen.

Tutkituista tekijöistä paras ratkaisu sekä yllälämpenemisiongelman estämiseksi ja E-luvun pienentämiseksi on valaistuksen ominaissähkötehon pienentäminen. Kuitenkaan tällä hetkellä käytössä olevan Suomen rakennusmääräyskokoelman osan D5 luonnoksessa [9] esitetyllä laskennalla valaistuksen ominaissähkötehoa ei saada asuinkerrostalossa helpolla alennettua niin paljoa, että siitä olisi hyötyä E-luvun kannalta. Täten valaistuksen ominaissähkötehon alentaminen jää valaistussuunnittelijan mietittäväksi.

Rakennuksen E-luku ja energiatehokkuus on aina eri tekijöiden yhteisvaikutusten summa. Jos rakennuksen tilojen yllälämpenemistä voidaan tarpeeksi hillitä, kannattaa vaipan lämmönjohtavuuden alentamiseen panostaa. Alhaisen lämmönjohtavuuden omaavilla rakenteilla on kuitenkin yksi suurimmista vaikutuksista rakennuksen E-lukuun. Jos yllälämpenemistä ei voida tarpeeksi hillitä passiivisin keinoin, kannattaa järkevissä määrin tinkiä rakenteiden U-arvoista ja panostaa muihin tekijöihin E-luvun alentamiseksi.

Suomen rakennusmääräyskokoelman osan D3 [1] mukainen E-lukulaskenta on vielä niin uusi aihe, ettei siitä ole tehty paljoa tutkimuksia. Tätä insinööriötä tehtäessä havaittiin, että tutkimisen arvoisia, E-lukuun vaikuttavia tekijöitä olisivat muun muassa rakennuksen ikkunat ominaisuuksineen, rakennuksen koko, eri energiamuodot erilaisissa rakennuksissa ja eri rakennusluokkiin merkittävimmin vaikuttavat tekijät. Myös jäähdytysjärjestelmän käyttämistä kannattaisi tutkia, koska sen avulla saadaan tilojen astetuntilukuja laskettua merkittävästi (kuitenkin E-luvun kustannuksella). Täten aiheesta saisi tehtyä monia hyviä tutkimuksia ja opinnäytetöitä.

## LÄHTEET

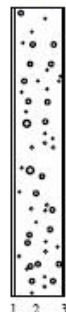
1. Ympäristöministeriö. Suomen rakennusmääräyskokoelman osa D3. PDF-dokumentti. [http://www.finlex.fi/data/normit/37188-D3-2012\\_Suomi.pdf](http://www.finlex.fi/data/normit/37188-D3-2012_Suomi.pdf). Ei päivitystietoja. Luettu 26.11.2012.
2. Kurnitski, Jarek. Energiamääräykset 2012 - Opas uudisrakennusten energiamääräysten soveltamiseen. Sastamala: Vammalan kirjapaino Oy. 2012.
3. Suomen Rakennusinsinöörien liitto RIL Ry. RIL 249-2009 Matalaenergiarakentaminen asuinrakennukset. Saarijärvi: Offset Oy. 2009.
4. Sarja, Asko. Puhelinkeskustelu 18.3.2013. Valtion teknillinen tutkimuskeskus (VTT). Professori. 2013.
5. Paroc Oy. Yrityksen WWW-sivut. <http://www.energiaviisastalo.fi>. Ei päivitystietoja. Luettu 11.1.2013.
6. Ympäristöministeriö. PDF-dokumentti. <http://www.ymparisto.fi/download.asp?contentid=126233&lan=fi>. Ei päivitystietoja. Luettu 9.1.2013.
7. Ympäristöministeriö. WWW-dokumentti. <http://www.ymparisto.fi/default.asp?node=14527&lan=fi>. Päivitetty 8.7.2011. Luettu 9.1.2013.
8. Ympäristöministeriö. Uusien rakennusten energiamääräykset 2012 - Valtioneuvoston tiedotustila 30.3.2011. PDF-dokumentti. <http://www.ymparisto.fi/download.asp?contentid=126212&lan=fi>. Päivitetty 30.3.2011. Luettu 9.1.2013.
9. Ympäristöministeriö. Suomen rakennusmääräyskokoelman osa D5 (luonnos). PDF-dokumentti. <http://www.ymparisto.fi/download.asp?contentid=135289&lan=FI>. Ei päivitystietoja. Luettu 26.11.2012.
10. Ympäristöministeriö. Suomen rakennusmääräyskokoelman osa D2. PDF-dokumentti. [http://www.finlex.fi/data/normit/37187-D2-2012\\_Suomi.pdf](http://www.finlex.fi/data/normit/37187-D2-2012_Suomi.pdf). Ei päivitystietoja. Luettu 7.3.2012.
11. Hyytiäinen, Petri. Puhelinkeskustelu 13.3.2013. Tekninen kehityssuunnittelija. Fenestra Oy.
12. Tuppurainen, Heini. Puhelinkeskustelu 20.3.2013. Myyntikoordinaattori. Lumon Oy.
13. REHVA Federation of European Heating, Ventilation and Air-conditioning Associations. Design of energy efficient ventilation and air-conditioning systems. Romania. 2012.
14. Ympäristöministeriö. LTO-laskin 2012, versio marraskuu 2011. WWW-dokumentti. <http://www.ymparisto.fi/download.asp?contentid=135660&lan=fi>. Ei päivitystietoja. Luettu 22.1.2013.



15. Valkeapää Aki 2012. Ilmanvaihdon lämmöntalteenoton vuosihyötysuhde. Lämmitys- ja jäähdytystarvelaskenta-kurssin opintomateriaali. Mikkelin ammattikorkeakoulu.
16. Motiva OY. Yrityksen WWW-sivut.  
[http://www.motiva.fi/toimialueet/uusiutuva\\_energia/](http://www.motiva.fi/toimialueet/uusiutuva_energia/). Päivitetty 4.5.2012. Luettu 4.3.2012.
17. Suomen standardisoimisliitto SFS. Standardi SFS-EN 12464-1. Helsinki: Suomen standardisoimisliitto. 2010.
18. Motiva Oy. Yrityksen WWW-sivut.  
<http://www.lampputieto.fi/valaistussuunnittelu/valaistusvoimakkuus/> Päivitetty 14.11.2012. Luettu 5.3.2013.
19. Ympäristöministeriö. Suomen rakennusmääräyskokoelman osa C4. PDF-dokumentti. <http://www.finlex.fi/data/normit/1931-C4s.pdf>. Ei päivitystietoja. Luettu 28.1.2012.

## Betonikerrostalon (perusmallin) rakenteet

VS1

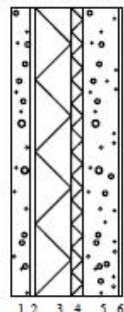


1. Pintakäsittely.
2. Betoniväliseinä, 200mm.  $\lambda = 1,7 \text{ W/mK}$
3. Pintakäsittely.

$$U = 2,65 \text{ W/m}^2\text{K}$$

US1

betoni-sandwich

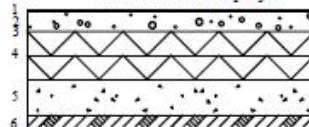


1. Ulkokuori, betoni 80mm.  $\lambda = 1,7 \text{ W/mK}$ .
2. Tuuletusrako 20mm.
3. Lämmöneriste, polystyreeni 150 mm.  $\lambda = 0,035 \text{ W/mK}$
4. Lämmöneriste, polystyreeni 50 mm.  $\lambda = 0,035 \text{ W/mK}$
5. Kantava rakenne, betoni 150mm.  $\lambda = 1,7 \text{ W/mK}$ .
6. Tasoite materiaali, 5 mm.  $\lambda = 1,2 \text{ W/mK}$ .

$$U = 0,16 \text{ W/m}^2\text{K}$$

AP1

teräsbetonilaatta alapohja

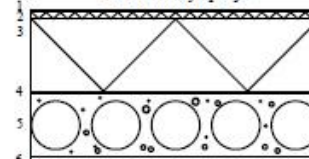


1. Pintamateriaali 20 mm.  $\lambda = 0,05 \text{ W/mK}$
2. Teräsbetonilaatta, 80 mm.  $\lambda = 1,7 \text{ W/mK}$
3. Suodatinkangas.
4. Lämmöneriste, polystyreeni 2x100 mm.  $\lambda = 0,035 \text{ W/mK}$
5. Salaojituskerros, tiivistetty sepele.  $R=0,15 \text{ m}^2\text{K/W}$ .
6. Perusta.  $R=2,0 \text{ m}^2\text{K/W}$

$$U = 0,12 \text{ W/m}^2\text{K}$$

YP1

ontelolaatta yläpohja

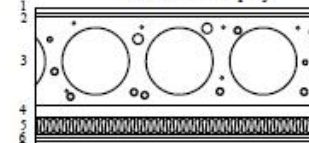


1. Vedeneriste.
2. Kova mineraalivilla, 30 mm.  $\lambda = 0,04 \text{ W/mK}$
3. Lämmöneriste, polystyreeni 300 mm.  $\lambda = 0,04 \text{ W/mK}$
4. Höyrysulku.
5. Kantava betonirakenne, ontelolaatta 265mm.  $\lambda = 1,4 \text{ W/mK}$
6. Pintamateriaali.  $R=0,2 \text{ m}^2\text{K/W}$

$$U = 0,11 \text{ W/m}^2\text{K}$$

VP1

ontelolaatta välipohja



1. Pintamateriaali 20 mm.  $\lambda = 0,05 \text{ W/mK}$
2. Tasoite, 15 mm.  $\lambda = 1,2 \text{ W/mK}$
3. Kantava betonirakenne, ontelolaatta 370mm.  $\lambda = 1,4 \text{ W/mK}$
4. Puhallus, 50 mm.  $R=0,18 \text{ m}^2\text{K/W}$
5. Mineraalivilla, 70mm.  $\lambda = 0,041 \text{ W/mK}$
6. Kipsilevy, 2 x 13mm.  $\lambda = 0,23 \text{ W/mK}$
7. Pintamateriaali, 20mm.  $\lambda = 0,05 \text{ W/mK}$

$$U = 0,3 \text{ W/m}^2\text{K}$$

## Puukerrostalon rakenteet

VS2

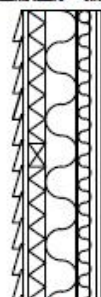


1. Pintakäsittely.
2. Kipsilevy, 13mm.  $\lambda = 0,23 \text{ W/mK}$
3. Ääneneriste 100mm  $\lambda = 0,05 \text{ W/mK}$  + Puurunko 102x51mm.
4. Kipsilevy, 13mm.  $\lambda = 0,23 \text{ W/mK}$
5. Pintakäsittely.

$$U = 0,42 \text{ W/m}^2\text{K}$$

US2

puurankarunko + lautaverhoaus

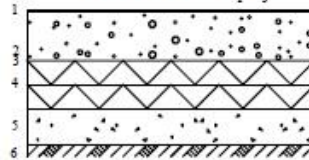


1. Lautaverhoaus  $\lambda = 0,14 \text{ W/mK}$ .
2. Tuuletusrako 22mm.
3. Tuulensuojakerros, kivillä 70 mm.  $\lambda = 0,05 \text{ W/mK}$  + Koolaus 68 mm K1200
4. Lämmöneriste, kivillä 150 mm.  $\lambda = 0,05 \text{ W/mK}$  + kantava puurunko
5. Höyrysulku.
6. Lämmöneriste, kivillä 50 mm.  $\lambda = 0,05 \text{ W/mK}$  + Koolaus 50x50 mm K600
7. Kipsilevy, 13mm.  $\lambda = 0,23 \text{ W/mK}$
8. Pintakäsittely.

$$U = 0,16 \text{ W/m}^2\text{K}$$

AP2

valetubetonilaatta alapohja

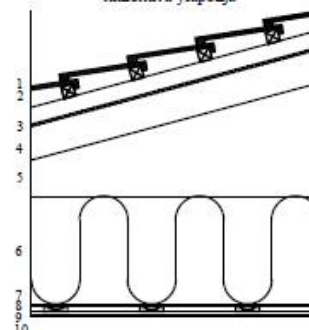


1. Pintamateriaali 20 mm.  $\lambda = 0,05 \text{ W/mK}$
2. Valettu betoni, 200 mm.  $\lambda = 1,7 \text{ W/mK}$
3. Suodatinkangas.
4. Lämmöneriste, polystyreeni 2x100 mm.  $\lambda = 0,035 \text{ W/mK}$
5. Salaojituskerros, tiivistetty sepele.  $R=0,15 \text{ m}^2\text{K/W}$ .
6. Perusta.  $R=2,0 \text{ m}^2\text{K/W}$

$$U = 0,12 \text{ W/m}^2\text{K}$$

YP2

tuulettuva yläpohja

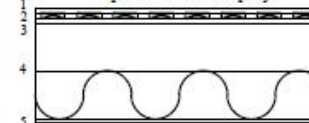


1. Vesikate, tiili 30mm.  $\lambda = 0,95 \text{ W/mK}$
2. Korotusrima 50x50 mm.
3. Aluskate.  $R=0,03 \text{ m}^2\text{K/W}$
4. Vesikatot kantavarakenn.
5. Tuulettuva ullakko.
6. Puhallusvilla 450mm.  $\lambda = 0,055 \text{ W/mK}$  + kantava rakenne (puurunko).
7. Höyrysulku.  $R=0,03 \text{ m}^2\text{K/W}$
8. Harvalauditus 22x100mm. K300.
9. Kipsilevy, 13mm.  $\lambda = 0,23 \text{ W/mK}$
10. Pintakäsittely.

$$U = 0,11 \text{ W/m}^2\text{K}$$

VP2

puurunkoinen välipohja



1. Pintamateriaali 20 mm.  $\lambda = 0,05 \text{ W/mK}$
2. Harvalauditus 20mm.
3. Kuitulevy 20mm.  $\lambda = 0,14 \text{ W/mK}$
4. Kantava puurunko 400x100mm. K600. + Ääneneriste 200 mm.  $\lambda = 0,041 \text{ W/mK}$
5. Kipsilevy, 2 x 13mm.  $\lambda = 0,23 \text{ W/mK}$
6. Pintakäsittely.

$$U = 0,17 \text{ W/m}^2\text{K}$$

**LIITE 2.****Perusmallin lämmitysjärjestelmän sähköenergian laskenta**

Yksityiskohtaiset kaavat lämmitysjärjestelmän sähköenergian laskentaan on esitetty Suomen rakennusmääräys kokoelman osassa D5 [9, s.42-54].

$$W_{\text{lämmitys}} = W_{\text{tilat}} + W_{\text{tuotto,apu}} + W_{\text{lkv,pumppu}} + W_{\text{aurinko,pumput}} + W_{\text{LP,lämmitys}}$$

$e_{\text{tilat}}$ (kWh/(m <sup>2</sup> ,a))	$A_{\text{netto,i}}$ (m <sup>2</sup> )			$W_{\text{tilat}}$ (kWh/a)	Huom.
2	4422			8844	

$e_{\text{tuotto}}$ (kWh/(m <sup>2</sup> ,a))	$A_{\text{netto}}$ (m <sup>2</sup> )			$W_{\text{tuotto,apu}}$ (kWh/a)	Huom.
0,07	4422			309,54	

$\phi_{\text{lkv,pumppu}}$ (W/(dm <sup>3</sup> /s))	$q_{v,\text{lkv,mit}}$ (dm <sup>3</sup> /s))	$\Delta T_{\text{lkv,pumppu}}$ (h/vrk)	kerroin	$W_{\text{lkv,pumppu}}$ (kWh/a)	Huom.
200	1	24	0,365	1752	1

Ei aurinkokeräimiä				$W_{\text{aurinko,pumput}}$ (kWh/a)	Huom.
				0	

Ei lämpöpumppua				$W_{\text{LP,lämmitys}}$ (kWh/a)	Huom.
				0	2

$W_{\text{lämmitys}}$ (kWh/a)
10905,5

1. Voidaan käyttää kun tarkkaa tietoa pumpun sähkötehosta ei ole.
2. RIUSKA osaa laskea lämpöpumpun sähköenergian kulutuksen, jos käytetään lämpöpumppua.

Simulointien tulokset: Rakenteiden U-arvot. Betonikerrostalo

Ulkoseinät, US1	Eristeen $\lambda =$ 0,035 W/mK					
Eristepak- suus	Rakenteen U-arvo	Suhteellinen U- arvo	$Q_{\text{lämmi-tys,tilat,omin,brutto}}$	E-luku	Suhteellinen E-luku	Astetuntilu- ku 418
mm	W/m <sup>2</sup> K	%	kWh/m <sup>2</sup> a	kWh/m <sup>2</sup> a	%	°Ch
50	0,52	-125,0	57,4	144,9	88,7	58
100	0,3	12,5	44,4	135,8	95,7	106
150	0,21	68,8	39,2	132,1	98,5	120
<b>200</b>	<b>0,16</b>	<b>100,0</b>	<b>36,4</b>	<b>130,2</b>	<b>100,0</b>	<b>126</b>
250	0,13	118,8	34,7	128,9	100,9	132
300	0,11	131,3	33,5	128,1	101,6	142
350	0,10	137,5	29,6	127,5	102,0	146
400	0,08	150,0	32,0	127,1	102,4	152
450	0,07	156,3	31,5	126,7	102,7	152
500	0,07	156,3	31,1	126,4	102,9	152
600	0,06	162,5	30,5	126,0	103,2	156

Yläpoh- ja, YP1	Eristeen $\lambda =$ 0,04 W/mK					
Eriste- paksuus	Rakenteen U- arvo	Suhteellinen U- arvo	$Q_{\text{lämmi-tys,tilat,omin,brutto}}$	E-luku	Suhteellinen E-luku	Astetuntilu- ku 418
mm	W/m <sup>2</sup> K	%	kWh/m <sup>2</sup> a	kWh/m <sup>2</sup> a	%	°Ch
50	0,38	-145,5	45,6	136,6	95,0	62
100	0,26	-36,4	41,4	133,7	97,3	94
150	0,19	27,3	39,2	132,1	98,5	110
200	0,16	54,5	37,9	131,2	99,2	118
250	0,13	81,8	37,0	130,6	99,7	122
<b>300</b>	<b>0,11</b>	<b>100,0</b>	<b>36,4</b>	<b>130,2</b>	<b>100,0</b>	<b>126</b>
350	0,10	109,1	36,0	129,9	100,2	130
400	0,09	118,2	35,6	129,6	100,4	134
450	0,08	127,3	35,3	129,4	100,6	136
500	0,07	136,4	35,1	129,2	100,7	142
600	0,06	145,5	34,7	129,0	100,9	146
700	0,05	154,5	34,5	128,8	101,1	150

Perusmallin energiatulokset korostettu.

## Simulointien tulokset: Rakenteiden U-arvot. Betonikerrostalo

Alapohja, AP1	Eristeen $\lambda = 0,035 \text{ W/mK}$						
Eristepaksuus	Rakenteen U-arvo	Suhteellinen U-arvo	$Q_{\text{lämmitys, tilat, omin, brutto}}$	E-luku	Suhteellinen E-luku	Astetuntiluku 418	Astetuntiluku 126
mm	$\text{W/m}^2\text{K}$	%	$\text{kWh/m}^2\text{a}$	$\text{kWh/m}^2\text{a}$	%	$^{\circ}\text{Ch}$	$^{\circ}\text{Ch}$
50	0,24	0,0	39,8	132,6	98,1	126	0
100	0,18	50,0	38,0	131,3	99,1	126	2
150	0,14	83,3	37,0	130,6	99,7	126	14
<b>200</b>	<b>0,12</b>	<b>100,0</b>	<b>36,4</b>	<b>130,2</b>	<b>100,0</b>	<b>126</b>	<b>30</b>
250	0,10	116,7	36,0	129,9	100,2	126	48
300	0,09	125,0	35,7	129,6	100,4	126	66
350	0,08	133,3	35,4	129,4	100,6	126	76
400	0,07	141,7	35,2	129,3	100,7	126	86
450	0,06	150,0	35,1	129,2	100,8	126	98
500	0,06	150,0	35,0	129,1	100,8	126	106
600	0,05	158,3	34,8	129,0	100,9	126	124

Ovet	Eristeen $\lambda = 0,04 \text{ W/mK}$						
Eristepaksuus	Oven U-arvo	Suhteellinen U-arvo	$Q_{\text{lämmitys, tilat, omin, brutto}}$	E-luku	Suhteellinen E-luku	Astetuntiluku 418	Astetuntiluku 126
mm	$\text{W/m}^2\text{K}$	%	$\text{kWh/m}^2\text{a}$	$\text{kWh/m}^2\text{a}$	%	$^{\circ}\text{Ch}$	$^{\circ}\text{Ch}$
17,5	1,44	54,5	38,6	131,7	98,8	126	26
20,0	1,32	66,7	38,0	131,3	99,1	126	28
25,0	1,14	84,8	37,1	130,7	99,6	126	28
<b>30,0</b>	<b>0,99</b>	<b>100,0</b>	<b>36,4</b>	<b>130,2</b>	<b>100,0</b>	<b>126</b>	<b>30</b>
32,5	0,94	105,1	36,1	130,0	100,2	126	30
35,0	0,88	111,1	35,9	129,8	100,3	126	30
40,0	0,80	119,2	35,4	129,5	100,5	126	30
45,0	0,72	127,3	35,1	129,2	100,7	126	30
50,0	0,66	133,3	34,8	129,0	100,9	126	32

Perusmallin energiatulokset korostettu.

Simulointien tulokset: Rakenteiden U-arvot. Betonikerrostalo

Ikkunat								
Ikkunan valmistaja	Ikkunan malli	Ikkunan U-arvo	Suhteellinen U-arvo	$g_w$ -arvo	$Q_{\text{l\ddot{a}mmi-tyt,tilat,omin,brutto}}$	E-luku	Suhteellinen E-luku	Aste-tuntilu-ku 418
		$W/m^2 K$						
Domus	MEK-131	0,7	68,6	32,0	23,8	121,3	93,2	266
Skaala ikkunat ja ovet Oy	Beeta kiinteä puu, 474	0,83	81,4	31,0	27,6	124,0	95,2	190
<b>Skaala ikkunat ja ovet Oy</b>	<b>Beeta puu, 550</b>	<b>1,02</b>	<b>100,0</b>	<b>31,0</b>	<b>36,4</b>	<b>130,2</b>	<b>100,0</b>	<b>126</b>
Skaala ikkunat ja ovet Oy	Gamma puu, 568	1,14	111,8	32,0	38,3	131,5	101,1	82

Yhteisvaikutukset						
Eristystaso	Rakenne	Rakenteen U-arvo	$Q_{\text{l\ddot{a}mmi-tyt,tilat,omin,brutto}}$	E-luku	Suhteellinen E-luku	Astetuntiluku 418
		$W/m^2 K$				
Normitalo	US1	0,17	37,2	130,8	100,4	132
	YP1	0,09				
	AP1	0,16				
	IKK	1,00				
	OVI	1,00				
Perusmalli	US1	0,16	36,4	130,2	100,0	126
	YP1	0,11				
	AP1	0,12				
	IKK	1,00				
	OVI	1,00				
Passiivi	US1	0,09	16,8	116,2	89,2	446
	YP1	0,06				
	AP1	0,06				
	IKK	0,70				
	OVI	0,90				

Perusmallin energiatulokset korostettu.

Simulointien tulokset: Rakenteiden U-arvot. Puukerrostalo

Ulkosei- nät, US2	Eristeen $\lambda =$ 0,05 W/mK					
Eriste- paksuus	Rakenteen U-arvo	Suhteellinen U- arvo	Q <sub>lämmi- tys,tilat,omin,brutto</sub>	E-luku	Suhteellinen E-luku	Astetunti- luku 418
mm	W/m <sup>2</sup> K	%	kWh/m <sup>2</sup> a	kWh/ m <sup>2</sup> a	%	°Ch
70	0,48	300,0	57,4	144,8	110,4	668
120	0,32	200,0	47,8	138,1	105,3	706
170	0,24	150,0	42,9	134,7	102,6	728
220	0,2	125,0	40,0	132,6	101,1	756
<b>270</b>	<b>0,16</b>	<b>100,0</b>	<b>38,0</b>	<b>131,2</b>	<b>100,0</b>	<b>770</b>
320	0,14	87,5	36,6	130,2	99,2	776
370	0,12	75,0	35,5	129,5	98,7	786
420	0,11	68,8	34,7	128,9	98,2	794
470	0,10	62,5	34,0	128,4	97,9	796
520	0,09	56,3	33,5	128,1	97,6	800
570	0,08	50,0	33,0	127,7	97,3	808
620	0,08	50,0	32,7	127,5	97,1	810

Yläpoh- ja, YP2	Eristeen $\lambda =$ 0,055 W/mK					
Eriste- paksuus	Rakenteen U-arvo	Suhteellinen U- arvo	Q <sub>lämmi- tys,tilat,omin,brutto</sub>	E-luku	Suhteellinen E-luku	Astetunti- luku 418
mm	W/m <sup>2</sup> K	%	kWh/m <sup>2</sup> a	kWh/ m <sup>2</sup> a	%	°Ch
50	0,63	572,7	57,2	144,7	110,3	614
100	0,4	363,6	48,7	138,8	105,8	636
150	0,29	263,6	44,7	137,0	104,4	672
200	0,23	209,1	42,4	134,3	102,4	694
250	0,19	172,7	40,8	133,3	101,6	716
300	0,16	145,5	39,8	132,5	101,0	738
350	0,14	127,3	39,0	132,0	100,6	750
400	0,13	118,2	38,4	131,6	100,3	766
<b>450</b>	<b>0,11</b>	<b>100,0</b>	<b>38,0</b>	<b>131,2</b>	<b>100,0</b>	<b>770</b>
500	0,10	90,9	37,6	131,0	99,8	778
600	0,09	81,8	37,0	130,5	99,5	790
700	0,07	63,6	36,6	130,2	99,2	796

Perusmallin energiatulokset korostettu.

## Simulointien tulokset: Rakenteiden U-arvot. Puukerrostalo

Alapoh- ja, AP2	Eristeen $\lambda =$ 0,035 W/mK						
Eriste- paksuus	Rakenteen U- arvo	Suhteellinen U- arvo	Q <sub>lämmi- tys,tilat,omi n,brutto</sub>	E-luku	Suhteel- linen E- luku	Astetunti- luku 418	Astetunti- luku 126
mm	W/m <sup>2</sup> K	%	kWh/m <sup>2</sup> a	kWh/ m <sup>2</sup> a	%	°Ch	°Ch
50	0,23	191,7	41,3	133,6	101,8	770	40
100	0,17	141,7	39,6	132,4	100,9	770	80
150	0,14	116,7	38,6	131,7	100,3	770	118
<b>200</b>	<b>0,12</b>	<b>100,0</b>	<b>38,0</b>	<b>131,2</b>	<b>100,0</b>	<b>770</b>	<b>152</b>
250	0,10	83,3	37,5	130,9	99,8	770	182
300	0,09	75,0	37,2	130,7	99,6	770	208
350	0,08	66,7	37,0	130,5	99,4	770	232
400	0,07	58,3	36,8	130,4	99,3	770	248
500	0,06	50,0	36,5	130,1	99,2	770	270
600	0,05	41,7	36,3	130,0	99,1	770	300

Ovet	Eristeen $\lambda =$ 0,04 W/mK						
Eriste- pak- suus	Oven U-arvo	Suhteellinen U- arvo	Q <sub>lämmi- tys,tilat,omi n,brutto</sub>	E-luku	Suhteel- linen E- luku	Astetunti- luku 418	Astetunti- luku 126
mm	W/m <sup>2</sup> K	%	kWh/m <sup>2</sup> a	kWh/ m <sup>2</sup> a	%	°Ch	°Ch
17,5	1,44	145,5	40,3	132,8 58	101,2	770	146
20,0	1,32	133,3	39,7	132,4	100,9	770	146
25,0	1,14	115,2	38,7	131,7	100,4	770	146
<b>30,0</b>	<b>0,99</b>	<b>100,0</b>	<b>38,0</b>	<b>131,2</b>	<b>100,0</b>	<b>770</b>	<b>152</b>
32,5	0,94	94,9	37,7	131,0	99,8	770	152
35,0	0,88	88,9	37,4	130,8	99,7	770	152
40,0	0,80	80,8	36,9	130,5	99,4	770	156
45,0	0,72	72,7	36,6	130,2	99,2	770	158
50,0	0,66	66,7	36,3	130,0	99,1	770	160

Perusmallin energiatulokset korostettu.



## Simulointien tulokset: Rakenteiden U-arvot. Puukerrostalo

Ikkunat								
Ikkunan valmistaja	Ikkunan malli	Ikkunan U-arvo	Suhteellinen U-arvo	$g_w$ -arvo	$Q_{\text{l\ddot{a}mmitys, tilat, omin, brutto}}$	E-luku	Suhteellinen E-luku	Astetuntiluku 418
		$W/m^2K$	%	%	$kWh/m^2a$	$kWh/m^2a$	%	$^{\circ}Ch$
Domus	MEK-131	0,7	68,6	33,0	24,8	121,9	92,9	1206
Skaala ikkunat ja ovet Oy	Beeta kiinteä puu, 474	0,82	80,4	30,9	28,7	124,7	95,0	986
<b>Skaala ikkunat ja ovet Oy</b>	<b>Beeta puu, 550</b>	<b>1,02</b>	<b>100,0</b>	<b>31,0</b>	<b>38,0</b>	<b>131,2</b>	<b>100,0</b>	<b>770</b>
Skaala ikkunat ja ovet Oy	Gamma puu, 568	1,14	111,8	30,8	40,0	132,7	101,1	626

Yhteisvaikutukset						
Eristystaso	Rakenne	Rakenteen U-arvo	$Q_{\text{l\ddot{a}mmitys, tilat, omin, brutto}}$	E-luku	Suhteellinen E-luku	Astetuntiluku 418
		$W/m^2K$	$kWh/m^2a$	$kWh/m^2a$	%	$^{\circ}Ch$
Normitalo	US2	0,17	38,5	131,6	100,3	804
	YP2	0,09				
	AP2	0,16				
	IKK	1,00				
	OVI	1,00				
Perusmalli	<b>US2</b>	<b>0,16</b>	<b>38,0</b>	<b>131,2</b>	<b>100,0</b>	<b>770</b>
	<b>YP2</b>	<b>0,11</b>				
	<b>AP2</b>	<b>0,12</b>				
	<b>IKK</b>	<b>1,00</b>				
	<b>OVI</b>	<b>1,00</b>				
Passiivi	US2	0,09	17,1	116,3	88,6	1450
	YP2	0,06				
	AP2	0,06				
	IKK	0,70				
	OVI	0,90				

**Perusmallin energiatulokset korostettu.**

## Simulointien tulokset: Ikkunoiden pinta-alat

Kaikki rakennuksen ikkunat					
A <sub>ikk</sub>	Suhteellinen pinta-ala	Q <sub>lämmi-</sub> tys,tilat,omin,brutto	E-luku	Suhteellinen E-luku	Astetuntiluku 418
m <sup>2</sup>	%	kWh/m <sup>2</sup> a	kWh/ m <sup>2</sup> a	%	°Ch
275	50,0	26,6	123,3	94,7	38
330	60,0	28,6	124,7	95,8	52
385	70,0	30,5	126,1	96,8	58
440	80,0	32,5	127,4	97,9	86
495	90,1	34,5	128,8	99,0	110
<b>550</b>	<b>100,0</b>	<b>36,4</b>	<b>130,2</b>	<b>100,0</b>	<b>126</b>
605	110,0	38,4	131,5	101,1	146
660	119,9	40,3	132,9	102,1	158
713	129,7	42,2	134,3	103,1	166

Pohjoisen puoleiset ikkunat						
A <sub>ikk,pohjoinen</sub>	Suhteellinen pinta-ala	Q <sub>lämmi-</sub> tys,tilat,omin,brutto	E-luku	Suhteelli- nen E-luku	Astetunti- luku 418	Astetunti- luku 244
m <sup>2</sup>	%	kWh/m <sup>2</sup> a	kWh/ m <sup>2</sup> a	%	°Ch	°Ch
46	50,0	34,5	128,9	99,0	126	6
55	60,0	35,0	129,2	99,2	126	4
64	70,0	35,3	129,4	99,4	126	8
73	80,0	35,7	129,7	99,6	126	10
82	90,0	36,0	129,9	99,8	126	14
<b>91</b>	<b>100,0</b>	<b>36,4</b>	<b>130,2</b>	<b>100,0</b>	<b>126</b>	<b>14</b>
100	110,0	36,8	130,4	100,2	126	22
109	120,0	37,1	130,7	100,4	126	22
119	130,0	37,5	130,9	100,6	126	22

Idän puoleiset ikkunat					
A <sub>ikk,itä</sub>	Suhteellinen pinta-ala	Q <sub>lämmi-</sub> tys,tilat,omin,brutto	E-luku	Suhteellinen E-luku	Astetuntiluku 418
m <sup>2</sup>	%	kWh/m <sup>2</sup> a	kWh/ m <sup>2</sup> a	%	°Ch
59	50,0	34,3	128,7	98,9	38
71	60,0	34,7	129,0	99,1	52
83	70,0	35,1	129,3	99,3	58
94	80,0	35,5	129,6	99,5	86
106	90,0	36,0	129,9	99,8	110
<b>118</b>	<b>100,0</b>	<b>36,4</b>	<b>130,2</b>	<b>100,0</b>	<b>126</b>
130	110,0	36,8	130,5	100,2	146
142	119,9	37,3	130,8	100,5	158
154	130,0	37,7	131,1	100,7	166

Perusmallin energiatulokset korostettu.

## Simulointien tulokset: Ikkunoiden pinta-alat

Etelän puoleiset ikkunat						
$A_{\text{ikk,etelä}}$	Suhteellinen pinta-ala	$Q_{\text{lämmitys,tilat,omin,brutto}}$	E-luku	Suhteellinen E-luku	Astetuntiluku 418	Astetuntiluku 245
$\text{m}^2$	%	$\text{kWh/m}^2\text{a}$	$\text{kWh/m}^2\text{a}$	%	$^{\circ}\text{Ch}$	$^{\circ}\text{Ch}$
74	50,0	33,8	128,4	98,6	126	184
89	60,0	34,3	128,7	98,9	126	172
104	70,0	34,9	129,1	99,2	126	164
119	80,0	35,4	129,5	99,4	126	158
134	90,0	35,9	129,8	99,7	126	152
<b>149</b>	<b>100,0</b>	<b>36,4</b>	<b>130,2</b>	<b>100,0</b>	<b>126</b>	<b>146</b>
164	110,0	36,9	130,5	100,3	126	142
179	120,0	37,4	130,9	100,6	126	134
192	129,3	37,9	131,2	100,8	126	130

Lännen puoleiset ikkunat						
$A_{\text{ikk,länsi}}$	Suhteellinen pinta-ala	$Q_{\text{lämmitys,tilat,omin,brutto}}$	E-luku	Suhteellinen E-luku	Astetuntiluku 418	Astetuntiluku 314
$\text{m}^2$	%	$\text{kWh/m}^2\text{a}$	$\text{kWh/m}^2\text{a}$	%	$^{\circ}\text{Ch}$	$^{\circ}\text{Ch}$
96	50,0	33,1	127,9	98,2	126	108
115	60,0	33,8	128,3	98,6	126	118
134	70,0	34,4	128,8	98,9	126	126
154	80,4	35,1	129,3	99,3	126	130
173	90,0	35,7	129,7	99,6	126	134
<b>192</b>	<b>100,0</b>	<b>36,4</b>	<b>130,2</b>	<b>100,0</b>	<b>126</b>	<b>142</b>
211	109,9	37,0	130,6	100,3	126	150
230	119,8	37,7	131,1	100,7	126	152
249	129,8	38,3	131,5	101,0	126	164

Perusmallin energiatulokset korostettu.

## Simulointien tulokset: Parvekelasitukset

Lasit kaikissa parvekkeissa	Lasien pinta-ala 279,0 m <sup>2</sup>			
Parvekelasin ST-arvo	Q <sub>lämmitys,tilat,omin,brutto</sub>	E-luku	Suhteellinen E-luku	Astetuntiluku 418
%	kWh/m <sup>2</sup> a	kWh/m <sup>2</sup> a	%	°Ch
10	37,8	131,1	100,7	126
20	37,6	131,0	100,7	126
30	36,8	130,9	100,6	126
40	37,3	130,8	100,5	126
50	37,1	130,7	100,4	126
60	37,0	130,6	100,3	126
70	36,8	130,5	100,2	126
80	36,7	130,4	100,2	126
90	36,5	130,3	100,1	126
<b>100</b>	<b>36,4</b>	<b>130,2</b>	<b>100,0</b>	<b>126</b>

Lasit eteläjulkisivun parvekkeissa	Lasien pinta-ala 101,9 m <sup>2</sup>				
Parvekelasin ST-arvo	Q <sub>lämmitys,tilat,omin,brutto</sub>	E-luku	Suhteellinen E-luku	Astetuntiluku 418	Astetuntiluku 245
%	kWh/m <sup>2</sup> a	kWh/m <sup>2</sup> a	%	°Ch	°Ch
10	37,0	130,6	100,3	126	74
20	36,9	130,5	100,3	126	84
30	36,8	130,5	100,2	126	92
40	36,8	130,4	100,2	126	106
50	36,7	130,4	100,2	126	114
60	36,6	130,3	100,1	126	118
70	36,6	130,3	100,1	126	124
80	36,5	130,3	100,1	126	132
90	36,5	130,2	100,0	126	142
<b>100</b>	<b>36,4</b>	<b>130,2</b>	<b>100,0</b>	<b>126</b>	<b>146</b>

Perusmallin energiatulokset korostettu.

## Simulointien tulokset: Parvekelasitukset

Lasit länsijulkisivun parvekkeissa	Lasien pinta-ala 158,7 m <sup>2</sup>				
Parvekelasin ST-arvo	Q <sub>lämmitys,tilat,omin,brutto</sub>	E-luku	Suhteellinen E-luku	Astetuntiluku 418	Astetuntiluku 314
%	kWh/m <sup>2</sup> a	kWh/m <sup>2</sup> a	%	°Ch	°Ch
10	37,3	130,8	100,5	126	0
20	37,1	130,7	100,4	126	0
30	37,0	130,6	100,4	126	2
40	36,9	130,6	100,3	126	10
50	36,8	130,5	100,2	126	28
60	36,7	130,4	100,2	126	40
70	36,7	130,4	100,1	126	60
80	36,6	130,3	100,1	126	78
90	36,5	130,2	100,0	126	114
<b>100</b>	<b>36,4</b>	<b>130,2</b>	<b>100,0</b>	<b>126</b>	<b>142</b>

Lasit pohjoisjulkisivun parvekkeissa	Lasien pinta-ala 18,4 m <sup>2</sup>				
Parvekelasin ST-arvo	Q <sub>lämmitys,tilat,omin,brutto</sub>	E-luku	Suhteellinen E-luku	Astetuntiluku 418	Astetuntiluku 369
%	kWh/m <sup>2</sup> a	kWh/m <sup>2</sup> a	%	°Ch	°Ch
10	36,5	130,2	100,0	126	0
20	36,4	130,2	100,0	126	0
30	36,4	130,2	100,0	126	2
40	36,4	130,2	100,0	126	6
50	36,4	130,2	100,0	126	12
60	36,4	130,2	100,0	126	18
70	36,4	130,2	100,0	126	24
80	36,4	130,2	100,0	126	30
90	36,4	130,2	100,0	126	34
<b>100</b>	<b>36,4</b>	<b>130,2</b>	<b>100,0</b>	<b>126</b>	<b>38</b>

Perusmallin energiatulokset korostettu.

**LIITE 7.****Simulointien tulokset: Vaipan ilmatiiviys**

<b>Vaipan ilmatiiviys</b>					
$q_{50}$ $m^3/(h,m^2)$	Suhteellinen $q_{50}$ %	$Q_{\text{l\ae mmi-}}_{\text{tys,tilat,omin,brutto}}$ $kWh/m^2a$	E-luku $kWh/m^2a$	Suhteellinen E- luku %	Astetuntiluku 418 $^{\circ}Ch$
0,2	13,3	33,3	127,9	98,3	158
0,5	33,3	34,0	128,5	98,7	154
1,0	66,7	35,2	129,3	99,3	138
<b>1,5</b>	<b>100,0</b>	<b>36,4</b>	<b>130,2</b>	<b>100,0</b>	<b>126</b>
2,0	133,3	37,6	131,0	100,7	120
2,5	166,7	38,8	131,9	101,3	110
3,0	200,0	40,1	132,8	102,0	104
3,5	233,3	41,3	133,7	102,7	88
4,0	266,7	42,5	134,5	103,4	72

**Perusmallin energiatulokset korostettu.**

**LIITE 8.****Simulointien tulokset: Puhaltimien ominaissähköteho**

<b>Puhaltimien ominaissähköteho</b>					
Yhden puhaltimen SFP kW/(m <sup>3</sup> /s)	Suhteellinen SFP %	W <sub>puhaltimet</sub> kWh/m <sup>2</sup> ,a	E-luku kWh/m <sup>2</sup> ,a	Suhteellinen E-luku %	Astetuntiluku 418 °Ch
0,3	37,5	2,6	122,8	94,3	126
0,4	50,0	3,5	124,2	95,4	126
0,5	62,5	4,4	125,7	96,6	126
0,6	75,0	5,3	127,2	97,7	126
0,7	87,5	6,1	128,7	98,9	126
<b>0,8</b>	<b>100,0</b>	<b>7,0</b>	<b>130,2</b>	<b>100,0</b>	<b>126</b>
0,9	112,5	7,9	131,7	101,2	126
1,0	256,3	8,8	133,2	102,3	126

**Perusmallin energiatulokset korostettu.**

## Simulointien tulokset: Ilmanvaihdon lämmöntalteenotto

Lämmöntalteenoton tuloilmasuhde		Regeneratiivinen lämmönsiirrin( $t_{j, \min} = 0 \text{ °C}$ )			Astetuntiluku 418 °Ch
$\eta_{t, \text{mit}}$ -	Suhteellinen $\eta_{t, \text{mit}}$ %	$Q_{\text{lämmitys, iv, omin, brutto}}$ kWh/m <sup>2</sup> a	E-luku kWh/m <sup>2</sup> a	Suhteellinen E-luku %	
0,35	53,8	36,1	146,8	112,8	126
0,40	61,5	31,8	143,9	110,5	126
0,45	69,2	27,6	140,9	108,3	126
0,50	76,9	23,5	138,0	106,0	126
0,55	84,6	19,5	135,2	103,9	126
0,60	92,3	15,7	132,6	101,8	126
<b>0,65</b>	<b>100,0</b>	<b>12,3</b>	<b>130,2</b>	<b>100,0</b>	<b>126</b>
0,70	107,7	9,2	128,0	98,3	126
0,75	115,4	6,5	126,1	96,9	126
0,80	123,1	4,6	124,8	95,9	126
0,85	130,8	4,3	124,6	95,7	126
0,90	138,5	4,3	124,6	95,7	126

Lämmöntalteenoton tuloilmasuhde		Rekuperatiivinen lämmönsiirrin( $t_{j, \min} = +5 \text{ °C}$ )			Astetuntiluku 418 °Ch
$\eta_{t, \text{mit}}$ -	Suhteellinen $\eta_{t, \text{mit}}$ %	$Q_{\text{lämmitys, iv, omin, brutto}}$ kWh/m <sup>2</sup> a	E-luku kWh/m <sup>2</sup> a	Suhteellinen E-luku %	
0,35	58,3	36,1	146,8	111,4	126
0,40	66,7	31,8	143,9	109,1	126
0,45	75,0	27,7	141,0	107,0	126
0,50	83,3	23,9	138,3	105,0	126
0,55	91,7	20,5	135,9	103,1	126
0,60	100,0	17,3	133,7	101,4	126
0,65	108,3	14,6	131,8	100,0	126
0,70	116,7	12,4	130,2	98,8	126
0,75	125,0	10,7	129,1	97,9	126
0,80	133,3	10,0	128,5	97,5	126
0,85	141,7	10,0	128,5	97,5	126
0,90	150,0	10,0	128,5	97,5	126

Perusmallin energiatulokset korostettu.



**LIITE 10.****Simulointien tulokset: Ilmanjakotapa**

Simuloinnin numero ja järjestelmän tiedot	$q_{v,omin}$ $\text{dm}^3/\text{s},$ $\text{m}^2$	$W_{puhalti-}$ met $\text{kWh}/\text{m}^2,$ a	$Q_{lämmi-}$ tys,iv,omin,brutto $\text{kWh}/\text{m}^2\text{a}$	$Q_{lämmi-}$ tys,tilat,omin,brutto $\text{kWh}/\text{m}^2\text{a}$	E-luku $\text{kWh}/\text{m}^2$ a	Suhteellinen E- luku %	Astetuntiluku 418 °Ch	Huom.
<b>1.Perusmalli</b>	<b>0,5</b>	<b>7,0</b>	<b>12,3</b>	<b>36,4</b>	<b>130,2</b>	<b>100,0</b>	<b>126</b>	
2.Perusmalli + Ilmanvaihdon huoneistokohtainen ohjaus	0,4	5,6	9,6	33,8	124,1	95,3	126	1)
3.Perusmalli hajautetulla ilmanvaihdolla	0,5	6,9	12,3	36,4	130,1	99,9	126	
4.Perusmalli hajautetulla ilmanvaihdolla + Ilmanvaihdon huoneistokohtainen ohjaus	0,4	5,5	9,6	33,8	124,0	95,2	126	1)
5.Perusmalli hajautetulla ilmanvaihdolla + Ei IV-konehuoneita	0,5	6,9	12,2	32,2	127,2	97,7	154	
6.Perusmalli hajautetulla ilmanvaihdolla + Ilmanvaihdon huoneistokohtainen ohjaus + Ei IV-konehuoneita	0,4	5,5	9,5	29,7	121,2	93,1	154	1)

1) Ilmanvaihdon ilmavirralla ei ole vaikutusta tilojen astetuntilukuihin, koska ylälämpenemistä tutkitaan suunnitelluilla ilmavirroilla.

**Perusmallin energiatulokset korostettu.**

**Simulointien tulokset: Aurinkoenergian hyödyntäminen**

<b>Käyttöveden lämmitys aurinko-keräimillä</b>					
$\eta_{\text{keräimet,LKV}}$ -	$Q_{\text{keräimet, Ikv, omin}}$ kWh/m <sup>2</sup> a	$Q_{\text{lämmitys, Ikv, omin, osto}}$ kWh/m <sup>2</sup> a	E-luku kWh/m <sup>2</sup> a	Suhteellinen E-luku %	Astetuntilu- ku 418
<b>0</b>	<b>0,0</b>	<b>39,8</b>	<b>130,2</b>	<b>100,0</b>	<b>126</b>
0,1	4,0	35,9	127,4	97,9	126
0,2	8,0	31,9	124,6	95,7	126
0,3	12,0	27,9	121,8	93,6	126
0,4	15,9	23,9	119,0	91,4	126
0,5	19,9	19,9	116,2	89,3	126
0,6	23,9	15,9	113,4	87,1	126

<b>Kuluttajalaitteiden sähköenergian tuotto aurinkopaneeleilla</b>					
$\eta_{\text{paneelit, kulut}}$ -	$W_{\text{paneelit, kulut, omin}}$ kWh/m <sup>2</sup> a	$W_{\text{kulut, omin, osto}}$ kWh/m <sup>2</sup> a	E-luku kWh/m <sup>2</sup> a	Suhteellinen E-luku %	Astetuntilu- ku 418
<b>0</b>	<b>0,0</b>	<b>21,0</b>	<b>130,2</b>	<b>100,0</b>	<b>126</b>
0,1	2,1	18,9	126,6	97,3	126
0,2	4,2	16,8	123,0	94,5	126
0,3	6,3	14,7	119,5	91,8	126
0,4	8,4	12,6	115,9	89,0	126
0,5	10,5	10,5	112,3	86,3	126
0,6	12,6	8,4	108,7	83,5	126

<b>Valaistuksen sähköenergian tuotto aurinkopaneeleilla</b>					
$\eta_{\text{paneelit, valaistus}}$ -	$W_{\text{paneelit, valaistus, omin}}$ kWh/m <sup>2</sup> a	$W_{\text{valaistus, omin, osto}}$ kWh/m <sup>2</sup> a	E-luku kWh/m <sup>2</sup> a	Suhteellinen E-luku %	Astetuntilu- ku 418
<b>0</b>	<b>0,0</b>	<b>9,6</b>	<b>130,2</b>	<b>100,0</b>	<b>126</b>
0,1	1,0	8,7	128,5	98,7	126
0,2	1,9	7,7	126,9	98,7	126
0,3	2,9	6,7	125,3	98,7	126
0,4	3,9	5,8	123,6	98,7	126
0,5	4,8	4,8	122,2	98,9	126
0,6	5,8	3,9	120,3	98,5	126

**Perusmallin energiatulokset korostettu.**

## Simulointien tulokset: Aurinkoenergian hyödyntäminen

LVI-laitteiden sähköenergian tuotto aurinkopaneeleilla					
$\eta_{\text{paneelit, LVI}}$	$W_{\text{paneelit, LVI, omin}}$	$W_{\text{LVI, omin, osto}}$	E-luku	Suhteellinen E-luku	Astetuntiluku
-	kWh/m <sup>2</sup> a	kWh/m <sup>2</sup> a	kWh/m <sup>2</sup> a	%	418
<b>0</b>	<b>0,0</b>	<b>9,5</b>	<b>130,2</b>	<b>100,0</b>	<b>126</b>
0,1	0,9	8,5	128,6	98,8	126
0,2	1,9	7,6	127,0	97,5	126
0,3	2,8	6,6	125,4	96,3	126
0,4	3,8	5,7	123,7	95,1	126
0,5	4,729	4,7	122,1	93,8	126
0,6	5,7	3,8	120,5	92,6	126

Kuluttajalaitteiden ja valaistuksen sähköenergian tuotto aurinkopaneeleilla					
$\eta_{\text{paneelit, kulut\&valaistus}}$	$W_{\text{paneelit, kulut\&valaistus, omin}}$	$W_{\text{kulut\&valaistus, omin, osto}}$	E-luku	Suhteellinen E-luku	Astetuntiluku
-	kWh/m <sup>2</sup> a	kWh/m <sup>2</sup> a	kWh/m <sup>2</sup> a	%	418
<b>0</b>	<b>0,0</b>	<b>30,7</b>	<b>130,2</b>	<b>100</b>	<b>126</b>
0,1	3,1	27,6	125,0	96,0	126
0,2	6,1	24,5	119,8	92,0	126
0,3	9,2	21,5	114,5	88,0	126
0,4	12,3	18,4	109,3	84,0	126
0,5	15,3	15,3	104,1	80,0	126
0,6	18,4	12,3	98,9	76,0	126

Koko rakennuksen sähköenergian tuotto aurinkopaneeleilla					
$\eta_{\text{paneelit}}$	$W_{\text{paneelit, omin}}$	$W_{\text{sähkö, omin}}$	E-luku	Suhteellinen E-luku	Astetuntiluku
-	kWh/m <sup>2</sup> a	kWh/m <sup>2</sup> a	kWh/m <sup>2</sup> a	%	418
<b>0</b>	<b>0</b>	<b>40,1</b>	<b>130,2</b>	<b>100</b>	<b>126</b>
0,1	4,0	36,1	123,4	94,8	126
0,2	8,0	32,1	116,5	89,5	126
0,3	12,0	28,1	109,7	84,3	126
0,4	16,0	24,1	102,9	79,0	126
0,5	20,1	20,1	96,1	73,8	126
0,6	24,1	16,0	89,3	68,6	126

Perusmallin energiatulokset korostettu.

## Valaistuksen ominaissähkötehon ja käyttöajan laskenta

## Valaistuksen tilakohtaiset kertoimella f painotetut ominaissähkötehot

$f_{\text{val,ohj}}$	B	$\eta_{\text{valaistus}}$
-	-	-
0,90	0,60	0,35

Lamppu	Hehkul.	Halogeenil.	Pienoisloistel.	LED	Loistelamppu
$\eta_{\text{Km}}$ (lm/W)	10	12	50	50	80

Tila	$E_i$ lux	$\phi_{\text{val,omin,f,hehkul}}$ W/m <sup>2</sup>	$\phi_{\text{val,omin,f,halogeenil}}$ W/m <sup>2</sup>	$\phi_{\text{val,omin,f,pienoisloistel}}$ W/m <sup>2</sup>	$\phi_{\text{val,omin,f,LED}}$ W/m <sup>2</sup>	$\phi_{\text{val,omin,f,loistel}}$ W/m <sup>2</sup>
Tekninen tila	200	85,7	71,4	17,1	17,1	10,7
KPH / WC / Pukuh. / S	100	42,9	35,7	8,6	8,6	5,4
VH / Varasto / VSS	200	85,7	71,4	17,1	17,1	10,7
MH	300	128,6	107,1	25,7	25,7	16,1
OH	300	128,6	107,1	25,7	25,7	16,1
Porrash.	100	42,9	35,7	8,6	8,6	5,4
Hissi	100	42,9	35,7	8,6	8,6	5,4
K	300	128,6	107,1	25,7	25,7	16,1
Kertotila	300	128,6	107,1	25,7	25,7	16,1
KHH	300	128,6	107,1	25,7	25,7	16,1
ET	150	64,3	53,6	12,9	12,9	8,0

## Valaistuksen ominaissähkötehon ja käyttöajan laskenta

## Valaistuksen käyttöajan kuukausitasoinen laskenta

Auringon kokonaissäteilyenergia pystypinnoille eri ilmansuuntiin kuukausittain, $G_{\text{säteily, pystypinta}}$ , kWh/m <sup>2</sup> [9]													
	Tammi- kuu	Helmi- kuu	Maalis- kuu	Huhti- kuu	Touko- kuu	Kesä- kuu	Heinä- kuu	Elo- kuu	Syys- kuu	Loka- kuu	Marras- kuu	Joulu- kuu	Yhteen- sä
Pohjoinen	6,2	17,3	40,3	43,9	57,8	70,6	66,3	50	32,9	17,9	7,2	4,2	414,6
Koillinen	4,7	13,8	38,1	56,3	82,1	87,9	91,1	66,4	37,5	15,6	5,5	3,2	502,2
Itä	3,8	15,6	48,5	79,9	112,8	109,6	118,8	91,8	56,5	17,5	5,1	2,6	662,5
Kaakko	9,5	31	75,1	101,1	123,3	109,9	123,1	106	83,9	28,3	12,3	8,4	811,9
Etelä	12,9	41,4	89,5	107,3	116	101,6	115,5	100,4	100,5	37	16,8	11,8	850,7
Lounas	9,5	30,9	69,4	101,6	117,5	110,9	128,6	92,8	87,3	30	12,3	8,8	799,6
Länsi	3,8	15,6	43,7	80,6	104,5	111,2	122,7	78,8	59,3	18,8	5,1	2,9	647
Luode	4,7	14	36,9	56,8	76,3	89,1	91,2	61,1	38,1	15,7	5,6	3,2	492,7
Yhteensä	55,1	179,6	441,5	627,5	790,3	790,8	857,3	647,3	496	180,8	69,9	45,1	5181,2
Osuus vuotuisesta säteilyenergiasta (%)	1,1	3,5	8,5	12,1	15,3	15,3	16,5	12,5	9,6	3,5	1,3	0,9	100,0

Valaistuksen käyttöaika kuukausittain $\Delta T_{\text{valaistus}}$ , h													
	Tammi- kuu	Helmi- kuu	Maalis- kuu	Huhti- kuu	Touko- kuu	Kesä- kuu	Heinä- kuu	Elo- kuu	Syys- kuu	Loka- kuu	Marras- kuu	Joulu- kuu	Yhteen- sä
Käyttöaika kuukaudessa (%)	15,6	13,2	8,1	4,6	1,4	1,4	0,1	4,2	7,1	13,2	15,3	15,8	100,0
Käyttöaika kuukaudessa (h)	85,8	72,6	44,8	25,1	7,8	7,7	0,7	23,0	39,0	72,5	84,2	86,9	550,0
Käyttöaika päivässä (h)	2,8	2,6	1,4	0,8	0,3	0,3	0,0	0,7	1,3	2,3	2,8	2,8	-

**Simulointien tulokset: Valaisimet ja valaistuksen ominaissähköteho**

Valaisintyyppi	$W_{\text{valaistus, omin}}$ kWh/m <sup>2</sup> a	E-luku kWh/m <sup>2</sup> a	Suhteellinen E-luku %	Astetuntiluku 418
Loistelamppu	7,1	125,9	96,7	44
<b>Rakennuksen standardi-käyttö</b>	<b>9,6</b>	<b>130,2</b>	<b>100,0</b>	<b>126</b>
LED	11,4	130,2	100,0	44
Pienoisloistelamppu	11,4	130,2	100,0	44
Halogeenilamppu	47,3	173,9	133,6	68
Hehkulamppu	56,8	187,1	143,7	88

$\phi_{\text{val, omin, kesk}}$ W/m <sup>2</sup>	Suhteellinen $\phi_{\text{val, omin, kesk}}$ %	$W_{\text{valaistus, omin}}$ kWh/m <sup>2</sup> a	E-luku kWh/m <sup>2</sup> a	Suhteellinen E-luku %	Astetuntiluku 418
<b>11</b>	<b>100,0</b>	<b>9,6</b>	<b>130,2</b>	<b>100,0</b>	<b>126</b>
10	90,9	8,8	128,7	98,9	122
9	81,8	7,9	127,2	97,7	112
8	72,7	7,0	125,7	96,6	104
7	63,6	6,1	124,2	95,4	94
6	54,5	5,3	122,7	94,3	72
5	45,5	4,4	121,2	93,1	58

**Perusmallin energiatulokset korostettu.**

**LIITE 14(1).**
**Simulointien tulokset: Eri tekijöiden yhteisvaikutukset**

Simuloinnin numero ja tehtävät muutokset	Muuttuva tekijä ja arvo	$Q_{\text{lämmitys,iv,omin,brutto}}$ kWh/m <sup>2</sup> a	$Q_{\text{lämmitys,tilat,omin,brutto}}$ kWh/m <sup>2</sup> a	$Q_{\text{lämmitys,LKV,omin,osto}}$ kWh/m <sup>2</sup> a	$Q_{\text{keräimet, lkv, omin}}$ kWh/m <sup>2</sup> a	$W_{\text{LVI, omin, osto}}$ kWh/m <sup>2</sup> a	$W_{\text{paneelit,LVI, omin}}$ kWh/m <sup>2</sup> a	$W_{\text{valaistus, omin, osto}}$ kWh/m <sup>2</sup> a	E-luku kWh/m <sup>2</sup> a	Suhteellinen E-luku %	Astetuntiluku 418 °Ch
<b>1.Perusmalli</b>	-	<b>12,3</b>	<b>36,4</b>	<b>39,8</b>	<b>0,0</b>	<b>9,5</b>	<b>0,0</b>	<b>9,6</b>	<b>130,2</b>	<b>100,0</b>	<b>126</b>
2.Vaipan johtumislämpöhäviöiden pienentäminen	$U_{\text{US1}} = 0,11$ W/m <sup>2</sup> K $U_{\text{VP1}} = 0,09$ W/m <sup>2</sup> K $U_{\text{AP1}} = 0,09$ W/m <sup>2</sup> K	12,2	32,0	39,8	0,0	9,5	0,0	9,6	127,0	97,5	152
3.Vaipan ilmatii- viyden parantaminen	$q_{50} = 1,0$ m <sup>3</sup> /h,m <sup>2</sup>	12,1	30,8	39,8	0,0	9,5	0,0	9,6	126,2	96,9	162
4.Parvekelasien lisääminen	Parvekelasin ST 75 %	12,1	31,1	39,8	0,0	9,5	0,0	9,6	126,4	97,1	162
5.Ilmanvaihdon järjestelmätyypin muutos hajautettuun, huoneisto- kohtaisesti tehoss- tettavaan järjes- telmään	$q_{\text{v,omin}} = 0,4$ dm <sup>3</sup> /s,m <sup>2</sup> + IV- konehuo- neiden poisto	9,3	25,6	39,9	0,0	8,0	0,0	9,6	118,1	90,7	180

**Perusmallin energiatulokset korostettu.**

**LIITE 14(2).**
**Simulointien tulokset: Eri tekijöiden yhteisvaikutukset**

Simuloinnin numero ja tehtävät muutokset	Muuttuva tekijä ja arvo	$Q_{\text{lämmitys,iv,omin,brutto}}$ kWh/m <sup>2</sup> a	$Q_{\text{lämmitys,tilat,omin,brutto}}$ kWh/m <sup>2</sup> a	$Q_{\text{lämmitys,LKV,omin,osto}}$ kWh/m <sup>2</sup> a	$Q_{\text{keräimet,lkv,omin}}$ kWh/m <sup>2</sup> a	$W_{\text{LVI,omin,osto}}$ kWh/m <sup>2</sup> a	$W_{\text{paneelit,LVI,omin}}$ kWh/m <sup>2</sup> a	$W_{\text{valaistus,omin,osto}}$ kWh/m <sup>2</sup> a	E-luku kWh/m <sup>2</sup> a	Suhteellinen E-luku %	Astetuntiluku 418 °Ch
6.Puhaltimien sähköenergian pienentäminen	SFP = 0,7 kW/(m <sup>3</sup> /s)	9,3	25,6	39,9	0,0	7,3	0,0	9,6	116,9	89,8	180
7.Lämmöntalteenoton tehostaminen	$\eta_{t,mit} = 0,75$	4,8	25,6	39,9	0,0	7,3	0,0	9,6	113,8	87,4	180
8.Valaisinsähköenergian pienentäminen	$\phi_{val,omin,kesk} = 7,0 \text{ W/m}^2$	4,9	27,6	39,9	0,0	7,3	0,0	6,1	109,3	84,0	148
9.Käyttöveden lämmittäminen osaksi aurinkokeräimillä	$\eta_{keräimet,LKV} = 0,4$	4,9	27,6	24,0	16,0	7,3	0,0	6,1	98,2	75,4	148
10.LVI-laitesähkön tuottaminen osaksi aurinkopaneeleilla	$\eta_{paneelit,LVI} = 0,4$	4,9	27,6	24,0	16,0	4,4	2,9	6,1	93,2	71,6	148